



TUGAS AKHIR – MO.141326

**Analisa Tegangan Sisa dan Distorsi Pada Konstruksi
Bottom Kapal Survey Geomarin IV menggunakan Metode
Elemen Hingga dengan Variasi Urutan Pengelasan**

Fauzan Awal Ramadhan

NRP. 4313100129

Dosen Pembimbing :

Nur Syahroni, S.T., MT., Ph.D.

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2017



FINAL PROJECT – MO.141326

**Analysis of Residual Stress and Distortion in Bottom
Construction of Survey Ship Geomarin IV use Finite
Element Method with Variation of Welding
Sequence**

Fauzan Awal Ramadhan

NRP. 4313100129

Supervisors :

Nur Syahroni, S.T., MT., Ph.D.

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Marine Technology Faculty

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

**ANALISA TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA KONSTRUKSI
BOTTOM KAPAL SURVEY GEOMARIN IV MENGGUNAKAN METODE
ELEMEN HINGGA DENGAN VARIASI URUTAN PENGELASAN**

TUGAS AKHIR







Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

FAUZAN AWAL RAMADHAN

NRP. 4313 100 129

Disetujui oleh:

1. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  (Pembimbing I)
.....
2. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.  (Pembimbing II)
.....
3. Ir. Imam Rochani, M.Sc.  (Penguji I)
.....
4. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.  (Penguji II)
.....
5. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D.  (Penguji III)
.....
6. Yeyes Mulyadi, S.T., M.T., Ph.D.  (Penguji IV)
.....

SURABAYA, JULI 2017

ABSTRAK

Analisa Tegangan Sisa dan Distorsi Pada Konstruksi Bottom Kapal Survey Geomarin IV menggunakan Metode Elemen Hingga dengan Variasi Urutan Pengelasan

Nama Mahasiswa : Fauzan Awal Ramadhan
NRP : 4313100129
Departemen : Teknik Kelautan
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

Teknik pengelasan digunakan dalam berbagai bidang manufaktur dan industri terutama dalam bidang perkapalan dan industri maritim. Pada tahap fabrikasi pembuatan sebuah kapal, teknik pengelasan yang baik sangat diperlukan agar tidak terjadinya kegagalan-kegagalan pada sebuah konstruksi kapal tersebut. Salah satu permasalahan yang menjadi tantangan dalam dunia teknik pengelasan adalah adanya tegangan sisa dan distorsi pada hasil pengelasan. Simulasi yang dilakukan pada penelitian ini yaitu pengelasan pada konstruksi *bottom* Kapal Survey Geomarin IV dengan menggunakan elemen *shell* serta memiliki variasi terhadap urutan pengelasan. Pada penelitian ini dilakukan simulasi pengelasan konstruksi *bottom* untuk mendapatkan distribusi panas pada sambungan yang terjadi. Dengan menggunakan elemen *shell* menghasilkan suhu puncak 2178,9 K. Setelah melakukan simulasi pengelasan, dilanjutkan dengan simulasi tegangan sisa dan distorsi. Didapatkan tegangan sisa tarik maksimum yang terdapat pada konstruksi *bottom* ialah 356,32 Mpa, sedangkan tegangan sisa tekan maksimum bernilai 2,62 Mpa dari variasi urutan pengelasan kedua. Distorsi yang terjadi di konstruksi *bottom* untuk $X = 0$ mm sebesar 5,43 mm dan untuk $X = 1846$ mm distorsi yang terjadi sebesar 5,10 mm. Kesimpulan dari penelitian ini adalah nilai distorsi mencapai titik minimumnya, ketika dekat dengan area pengelasan atau di daerah frame.

Kata Kunci—Metode Elemen Hingga, Tegangan sisa, distorsi, Bottom, Heat Flux

(halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRACT

Analysis of Residual Stress and Distortion in Bottom Construction of Survey Ship
Geomarin IV use Finite Element Method with Variation of Welding Sequence

Name : Fauzan Awal Ramadhan
REG. : 4313100129
Department : Teknik Kelautan
Supervisors : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

Welding techniques are used in various manufacturing and industrial fields especially in the marine shipping and marine industries. In the fabrication stage of shipbuilding, good welding techniques are necessary to avoid failures in a vessel construction. One of the most challenging in welding technique is the presence of residual stress and distortion. This research is analyzing about welding simulation of a bottom construction in Geomarine IV survey vessel using shell element with welding sequence variation. In this research welding simulation of bottom construction is done to get heat distribution at the connection. Using a shell element produces a peak temperature of 2178.9 K. After performing welding simulation, proceed with a residual stress and distortion simulation. From the second welding variation the maximum tensile residual stress found in the bottom construction is 356,32 MPa, while the maximum tensile pressure value is 2.62 Mpa. The distortion occurred in the bottom construction for $X = 0$ mm is 5.43 mm and for $X = 1846$ mm the distortion is 5.10 mm. The conclusion of this research is that the distortion value reaches its minimum point, when close to the welding area or the frame area.

Keywords – Finite Element Method, Residual Stress, Distortion, Bottom, Heat Flux

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Pertama saya panjatkan puji syukur atas kehadiran Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya sehingga saya bisa mengerjakan tugas akhir dengan lancar.

Selain itu, saya ucapkan terimakasih kepada dosen pembimbing, orang tua, dan teman-teman atas bimbingan materi, dorongan dan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Dalam pembuatan tugas akhir ini masih terdapat hal-hal yang perlu diubah ataupun ditambahkan untuk kelancaran lanjutan tugas akhir ini kedepannya. Oleh karena itu, saya mengharapkan kritik dan saran.

Atas kritik dan sarannya saya ucapkan terima kasih.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

(halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMAKASIH

Dalam rangka penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua yang selalu memberikan dukungan moril maupun materiil.
2. Bapak Nur Syahroni S.T.,M.T.,Ph.D. selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan ilmu dan pengarahan dalam penyelesaian Tugas Akhir.
3. Bapak Ir. Mas Murtedjo, M.Eng. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan ilmu dan pengarahan dalam penyelesaian Tugas Akhir.
4. Teman-teman Tugas Akhir bimbingan Bapak Nur Syahroni S.T.,M.T.,Ph.D.
5. Teman-teman Valtameri Teknik Kelautan ITS angkatan 2013.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	1
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
UCAPAN TERIMA KASIH	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 Tegangan Sisa (<i>Residual Stress</i>)	6
2.2.2 Distorsi Pada Pengelasan	10
2.2.3 Pengelasan SAW (<i>Submerged Arc Welding</i>)	12
2.2.4 Distribusi Temperatur	13
2.2.5 Urutan Pengelasan	15
2.2.6 Dasar Berganda (<i>Double Bottom</i>)	17
2.2.7 Metode Elemen Hingga	18
BAB III	23
METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Metode Penelitian	23
3.2 Prosedur Penelitian	24
BAB IV	37
HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1. Beban <i>Heat Flux</i>	37
4.2. <i>Meshing Sensitivity</i>	41
4.3. Validasi Hasil	43

4.3.1.	<i>Temperature History</i>	43
4.3.2	Tegangan Sisa.....	47
4.3.3	Distorsi	48
4.4.	Variasi Urutan Pengelasan	50
4.5.	Hasil Distribusi Panas	51
4.6.	Hasil Tegangan Sisa.....	55
4.7.	Hasil Distorsi	58
BAB V		63
KESIMPULAN DAN SARAN		63
5.1.	Kesimpulan	63
5.2	Saran	63
Daftar Pustaka		65
LAMPIRAN.....		67
LAMPIRAN A.....		A-1
LAMPIRAN B.....		B-1
LAMPIRAN C.....		C-1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Tampak samping blok Bottom Kapal Survey Geomarin IV (Citra Mas, 2016)	2
Gambar 2. 1 Ilustrasi Terbentuknya Tegangan Sisa (Wiryosuwarto, 2000).....	7
Gambar 2. 2 Distribusi Tegangan Sisa pada Sambungan Las Tumpul (Wiryosuwarto, 2000)	8
Gambar 2. 3 Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi (Syahroni dan Hidayat, 2012)	10
Gambar 2. 4 Macam-macam distorsi dalam pengelasan (Wiryosuwarto, 2000) ..	11
Gambar 2. 5 Mesin Las Busur Listrik Terendam Otomatis (Sunaryo, 2008)	12
Gambar 2. 6 Gambar Skema proses SAW (Syahroni, 2011).....	13
Gambar 2. 7 urutan pengelasan (Wiryosuwarto, 2000)	15
Gambar 2. 8 Urutan pengelasan pada penyambungan pelat (Sunaryo, 2010)	16
Gambar 2. 9 Urutan pengelasan pada penyambungan profil (Sunaryo, 2010)	16
Gambar 2. 10 Urutan pengelasan profil terhadap plat (Sunaryo, 2010)	16
Gambar 2. 11 Konstruksi dasar berganda atau double bottom (bp3ipjakarta.ac.id)	17
Gambar 2. 12 Bagian-bagian yang ada pada double bottom (http://www.splashmaritime.com.au).....	17
Gambar 3. 1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	23
Gambar 3. 2 Tampak Samping Blok Kapal Survey Geomarin IV.....	25
Gambar 3. 3 Tampak Atas Blok Kapal Survey Geomarin IV.....	25
Gambar 3. 4 Tampak melintang double bottom pada frame Kapal Survey Geomarin IV.....	25
Gambar 3. 5 Shell Expansion Blok 1.6 Kapal Survey Geomarin IV (Citra Mas, 2016)	26
Gambar 3. 6 Permodelan Frames yang ada pada Blok 1.6 Kapal Survey Geomarin IV	27
Gambar 3. 7 Permodelan Bottom yang ada pada Blok 1.6 Kapal Suiurvey Geomarin IV.....	27
Gambar 3. 8 Frame dengan Jenis Solid Floor	28
Gambar 3. 9 Frame dengan Jenis Open Floor.....	28
Gambar 3. 10 Frame dengan Jenis Watertight Floor	28
Gambar 3. 11 Tampak Atas Frame 74, 75, dan 76 beserta bottom.....	29
Gambar 3. 12 Tampak Bawah Frame 74, 75, dan 76 beserta bottom	29
Gambar 3. 13 Hasil File Output dengan Ekstensi .iges.....	30
Gambar 3. 14 Detail Elemen SHELL 132 pada ANSYS (User Manual ANSYS)	31
Gambar 3. 15 Urutan Pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini.....	31
Gambar 3. 16 Diagram Alir untuk Analisis Thermal.....	32
Gambar 3. 17 Detail Elemen SHELL 281 pada ANSYS (User Manual ANSYS) 34	

Gambar 3. 18 Diagram Alir untuk Analisis Struktural	34
Gambar 4. 1 Komposisi Kimia Elektrode SAW	37
Gambar 4. 2 Panjang Area Pengelasan pada Frame 74	39
Gambar 4. 3 Panjang Area Pengelasan pada Frame 75	39
Gambar 4. 4 Panjang Area Pengelasan pada Frame 76	39
Gambar 4. 5 Ilustrasi Fillet Weld	39
Gambar 4. 6 Detail Pengelasan Fillet yang digunakan (The Lincoln Electric Company, 1973)	40
Gambar 4. 7 Grafik Meshing sensitivity elemen shell	42
Gambar 4. 8 Meshing ukuran 0.2 mm triangular dan 0.5 mm quadrilateral	43
Gambar 4. 9 Area Pembebanan	44
Gambar 4. 10 Simulasi Pada Area Pengelasan	45
Gambar 4. 11 Grafik Temperature history	45
Gambar 4. 12 Grafik Suhu Puncak pada Penelitian sebelumnya (Wibowo, 2016)	46
Gambar 4. 13 Pathline Analisis Tegangan Sisa	47
Gambar 4. 14 Tegangan sisa Bottom Kapal Survey Geomarin IV	47
Gambar 4. 15 Tegangan Sisa Penelitian Sebelumnya (Wibowo, 2016)	48
Gambar 4. 16 Grafik Distorsi Bottom Kapal Survey geomarin IV	49
Gambar 4. 17 Grafik Distorsi Penelitian Sebelumnya (Wibowo, 2016)	49
Gambar 4. 18 Distorsi pada urutan pengelasan konstruksi bottom Geomarin IV ..	50
Gambar 4. 19 Variasi Urutan Pengelasan 1	51
Gambar 4. 20 Variasi Urutan Pengelasan 2	51
Gambar 4. 21 Variasi Urutan Pengelasan 3	51
Gambar 4. 22 Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 1	52
Gambar 4. 23 Grafik Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 1	52
Gambar 4. 24 Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 2	53
Gambar 4. 25 Grafik Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 2	53
Gambar 4. 26 Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 3	54
Gambar 4. 27 Grafik Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 3	54
Gambar 4. 28 Variasi Urutan Pengelasan 1	56
Gambar 4. 29 Grafik Tegangan Sisa Variasi Urutan Pengelasan 1	56
Gambar 4. 30 Variasi Urutan Pengelasan 2	56
Gambar 4. 31 Grafik Tegangan Sisa Variasi Urutan Pengelasan 2	57
Gambar 4. 32 Variasi Urutan Pengelasan 3	57
Gambar 4. 33 Variasi Urutan Pengelasan 3	58
Gambar 4. 34 Grafik Distorsi pada variasi urutan pengelasan pertama	58
Gambar 4. 35 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan pertama	59
Gambar 4. 36 Grafik Distorsi pada variasi urutan pengelasan kedua	59
Gambar 4. 37 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan kedua	60
Gambar 4. 38 Grafik Distorsi pada variasi urutan pengelasan ketiga	60
Gambar 4. 39 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan ketiga	61

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Nilai Efisiensi <i>Thermal</i> setiap Jenis Pengelasan.....	38
Tabel 4. 2 Perbandingan Size Meshing, Jumlah Elemen, dan Tegangan Maksimum untuk elemen shell.....	42
Tabel 4.3. Total Waktu Pengelasan <i>Frame</i> 74 hingga 76.....	44
Tabel 4.4 Perbandingan Suhu Puncak.....	46
Tabel 4.5. Suhu Puncak Seluruh Variasi Arah Pengelasan.....	55
Tabel 4.6. Hasil Tegangan Sisa dari semua hasil urutan pengelasan.....	61
Tabel 4.7 Hasil Distorsi dari semua hasil urutan pengelasan.....	62

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

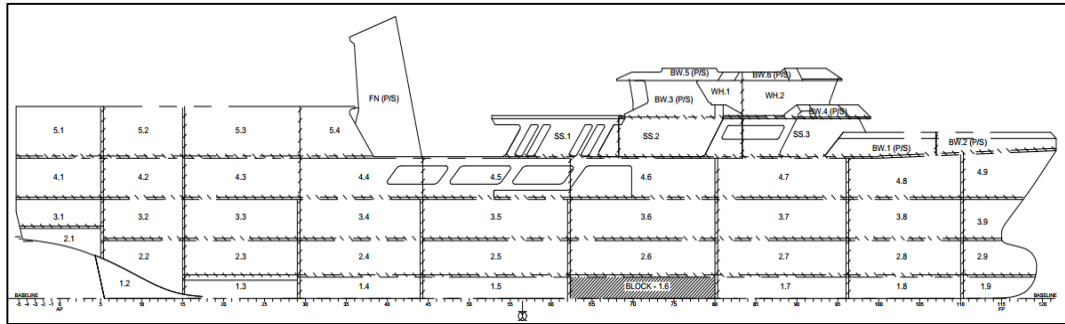
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Teknologi pengelasan merupakan salah satu teknologi yang memiliki peran sangat penting dalam kehidupan manusia. Bermula dari pemilihan material, prosedur pengelasan yang tepat, serta perlakuan setelah pengelasan merupakan beberapa hal yang dipertimbangkan dalam menghasilkan suatu produk pengelasan yang memuaskan. Dibutuhkan pengalaman serta inspeksi atau pengamatan yang baik untuk menghasilkan produk las-lasan yang bagus. Oleh sebab itu, dilakukan berbagai macam penelitian dalam mengembangkan teknologi pengelasan ini.

Pengelasan secara luas digunakan dalam berbagai macam industri, salah satunya industri maritim. Industri maritim merupakan salah satu industri strategis yang berkembang dengan banyak menyerap berbagai basis teknologi. Dalam industri maritim termasuk didalamnya adalah industri perkapalan, bahan baku yang digunakan 90% menggunakan plat baja, dengan penyambungan dalam konstruksinya menggunakan metode pengelasan. Dalam pembangunan konstruksi kapal terdapat 2 metode, yaitu pembangunan kapal dengan sistem seksi dan pembangunan kapal dengan sistem blok (Sunaryo, 2008). Pada penelitian-penelitian analisa tegangan sisa dan distorsi sebelumnya hanya dianalisa pada struktur yang sederhana, seperti potongan pelat dan potongan pipa. Dan sangat dibutuhkan adanya penelitian yang menganalisa pada obyek yang lebih kompleks dan bisa diaplikasikan pada dunia industri. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini bagian blok kapal Geomarin IV yang menjadi perhatian dalam penelitian ini yaitu bagian *bottom* (Gambar 1.1)

Dalam penyambungan dua logam atau lebih dapat menggunakan energi panas yang digunakan sesuai dengan kebutuhan. Bagian terpenting dari proses ini adalah proses pengelasan bergantung pada masukan panas lokal yang akan menghasilkan tegangan sisa yang tidak diinginkan dan deformasi dalam struktur las-lasan, terutama dalam kasus pelat logam. Oleh karena itu, memperkirakan besarnya deformasi dan karakterisasi las-lasan yang dipengaruhi oleh kondisi pengelasan sangat diperlukan.



Gambar 1. 1 Tampak samping blok *Bottom* Kapal *Survey Geomarin IV* (Citra Mas, 2016)

Distorsi merupakan hasil dari pengelasan akibat adanya *expansion* (pemuai) dan *contraction* (kontraksi) pada suatu logam las dan berdekatan dengan logam dasar selama terjadi pemanasan dan pendinginan dalam proses pengelasan. Proses terjadinya distorsi tidak dapat terprediksi, karena selama terjadinya pemanasan dan pendinginan tersebut banyak faktor yang dapat menyebabkan timbulnya penyusutan pada logam sehingga mengawali terjadinya distorsi.

Tegangan sisa atau *residual stress* merupakan salah satu hal penting yang harus diperhatikan dalam suatu proses pengelasan. Tegangan sisa adalah tegangan yang terjadi akibat adanya gaya tarik dan tekan akibat terjadinya panas di daerah sekitar kampuh las yang tersebar secara tidak merata.

Untuk menganalisa tegangan sisa dan distorsi bisa menggunakan metode-metode yang bersifat eksperimental, namun pada penelitian ini menggunakan metode numerik yaitu menggunakan metode elemen hingga. Didalam penelitian sebelumnya, (Wibisono, 2017) membandingkan *running time* hasil analisa tegangan sisa dan distorsi pada panel plat menggunakan jenis elemen *shell* dan jenis elemen *solid*. Dalam penelitian tersebut didapatkan hasil bahwa *running time* analisa *thermal* pada elemen *solid* memerlukan waktu 1 jam 43 menit dan analisa *structural* memerlukan waktu 30 menit 34 detik dan *running time* analisa *thermal* pada elemen *shell* memerlukan waktu 13 menit 23 detik dan analisa *structural* memerlukan waktu 7 menit 53 detik.

Dalam tugas akhir ini, akan dilakukan simulasi numerik untuk mengurangi besarnya tegangan sisa dan distorsi pada konstruksi *bottom* Kapal Survey Geomarin IV dengan memvariasikan pada urutan pengelasannya. Adapun penelitian ini tidak dilakukan secara eksperimental tetapi menggunakan metode elemen hingga menggunakan elemen *shell* dengan bantuan *software* ANSYS 16.0 untuk mendapatkan besarnya tegangan sisa dan distorsi.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, perumusan masalah yang akan diselesaikan dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Berapa besar tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada konstruksi *bottom* Kapal Survey Geomarin IV setelah proses pengelasan?
2. Bagaimana pengaruh variasi urutan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada konstruksi *bottom* Kapal Survey Geomarin IV setelah proses pengelasan?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan yang akan dicapai penulis dalam melakukan Tugas Akhir ini adalah:

1. Mengetahui besarnya tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada konstruksi *bottom* Kapal Survey Geomarin IV setelah proses pengelasan.
2. Mengetahui pengaruh variasi urutan pengelasan terhadap besar tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada konstruksi *bottom* Kapal Survey Geomarin IV setelah proses pengelasan.

1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan pengetahuan tentang pengaruh urutan pengelasan terhadap besarnya tegangan sisa dan distorsi yang akan digunakan pada pengelasan konstruksi *bottom* Kapal Survey Geomarin IV sehingga bisa dijadikan pertimbangan dan acuan dalam pengelasan yang tepat untuk meminimalkan distorsi dan/atau tegangan sisa yang terjadi, sehingga dihasilkan pengelasan yang baik.

1.5 Batasan Masalah

Agar ruang lingkup Tugas Akhir ini tidak melebar maka penulis membatasi masalah yang akan dibahas sebagai berikut:

1. Pengelasan dilakukan dengan metode las SAW (*Submerged Arc Welding*).
2. Variasi pengelasan berupa urutan pengelasan.
3. Pada pengelasan dianggap tidak ada cacat las yang lain.
4. Pengaruh radiasi dalam pengelasan diabaikan.
5. Elemen hingga yang dipakai menggunakan Elemen Shell.
6. Sambungan pengelasan yang dipakai menggunai *fillet welded T-Joint* 2 sisi
7. Jenis Elektroda yang dipakai yaitu Elektroda EM13K
8. *Frame* diasumsikan telah dilakukan pengelasan
9. Terdapat 3 variasi urutan pengelasan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Terjadinya tegangan sisa dan distorsi pada saat setelah proses pengelasan dipengaruhi oleh banyak faktor termasuk sifat material, geometri dan proses pengelasan. Untuk mengetahui besar tegangan sisa dan distorsi dapat diukur dengan melakukan eksperimen dengan metode-metode yang sudah ada. Tetapi dengan melakukan eksperimen itu sangat memakan waktu yang lama dan juga akurasi pengukuran sering bergantung pada presisi atau ketepatan dari perangkat yang dipakai dan prosedur pengukuran. Oleh karena itu, metode elemen hingga bisa digunakan sebagai alternatif dari metode eksperimental dalam memprediksi tegangan sisa dan distorsi pada bidang 3 dimensi yang dilas.

Wibowo (2016) melakukan penelitian pengaruh dari urutan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada struktur plat berpenegar dengan menggunakan metode elemen hingga. Pada penelitian tersebut permodelan dilakukan secara 3 dimensi dengan menggunakan proses pengelasan GMAW pada 1 sisi dan dengan 4 variasi urutan pengelasan. Dan didapatkan hasil bahwa alur pengelasan mendekati *stiffner* yang memiliki nilai tegangan sisa dan distorsi paling kecil.

Muhammad (2016) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi arus listrik sebagai welding heat input terhadap tegangan sisa dan distorsi pada pelat aluminium 5083, hasilnya didapatkan bahwa nilai tegangan sisa pada model single pass terhadap variasi arus listrik proses pengelasan adalah 100 A senilai 116 Mpa, 125 A senilai 145 Mpa, dan 125 A senilai 145 Mpa dan untuk nilai distorsi maksimum didapatkan hasil 100 A senilai 0.972 mm, 125 A senilai 1.26 mm, dan 150 A senilai 1.55 mm. Berdasarkan data diatas dapat disimpulkan bahwa kenaikan arus listrik pengelasan mengimplikasikan peningkatan nilai tegangan sisa dan distorsi pada titik-titik uji material.

Selain itu Wibisono (2017) juga melakukan simulasi yang tidak jauh berbeda dengan yang dilakukan Wibowo, yaitu analisa tegangan sisa pada panel plat dengan metode elemen hingga menggunakan jenis elemen *solid* dan elemen *shell*. Dalam permodelan, pengelasan dilakukan dengan menggunakan proses

pengelasan FCAW. Variasi yang digunakan pada penelitian tersebut adalah variasi urutan pengelasan dan variasi penggunaan jenis elemen. Terdapat 3 variasi urutan pengelasan yang digunakan yaitu pengelasan mendekati *transverse stiffner*, pengelasan bergantian mendekati dan menjauhi *transverse stiffner* dan pengelasan menjauhi *transverse stiffner*. Adapun variasi penggunaan jenis elemen yaitu elemen *solid* dan elemen *shell*. Dan dalam penelitian ini didapatkan perbandingan *Running Time* untuk analisa elemen *solid* dan elemen *shell*, dimana hasil *runiing time* yang tercepat adalah ketika memakai elemen *shell*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Tegangan Sisa (*Residual Stress*)

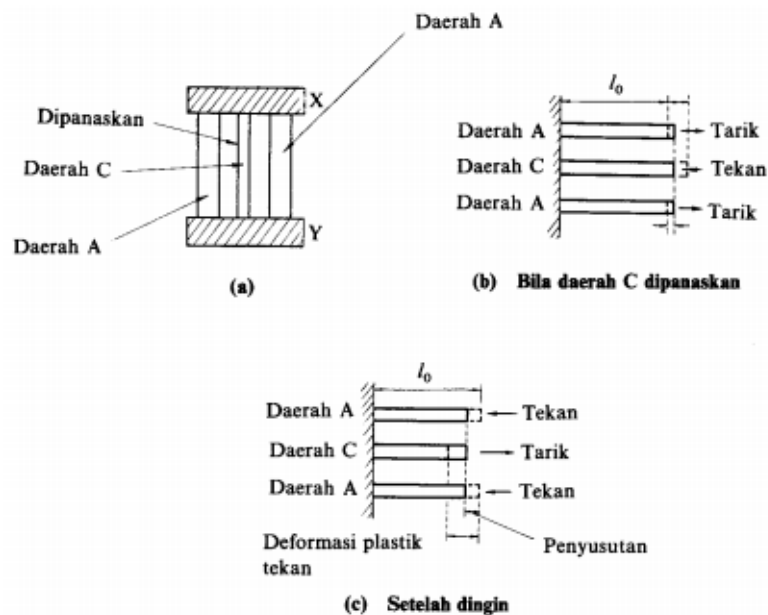
Tegangan sisa dapat terjadi pada material yang dikenai perubahan temperatur *non-uniform* atau biasa disebut tegangan panas. Tegangan sisa pada pengelasan adalah tegangan sisa internal setelah pengelasan saat pendinginan ke temperatur ruang. Tegangan sisa ini dapat terjadi pada daerah lasan dan sebagai hasil deformasi plastik lokal. Tegangan sisa yang terjadi ketika sebuah logam dikenai perubahan temperatur yang tidak seragam disebut juga dengan tegangan termal. Dan tegangan sisa yang terjadi pada benda kerja sangat bergantung pada penyebaran dan besarnya tegangan termal.

Tegangan sisa timbul karena adanya perbedaan temperatur yang besar sedangkan distorsi terjadi jika logam las dibiarkan bergerak leluasa selama proses pendinginan. Tegangan yang bekerja pada material meskipun tidak ada gaya luar yang bekerja bisa disebut juga sebagai tegangan sisa. Tegangan sisa yang terjadi karena proses pengelasan dapat dibagi menjadi dua kelompok (Wiryosuwarto, 2000), yaitu :

1. Tegangan sisa oleh adanya halangan dalam yang terjadi karena pemanasan dan pendinginan setempat pada bagian konstruksi yang bebas.
2. Tegangan sisa oleh adanya halangan luar, yang terjadi karena karena perubahan bentuk dan penyusutan dari konstruksi.

A. Proses Terjadinya Tegangan Sisa

Di dalam bukunya Wiryosumarto (2000) yang berjudul Teknologi Pengelasan Logam, proses terjadinya tegangan sisa diilustrasikan sesuai dengan Gambar 2.1, yaitu daerah C mengembang pada saat proses pengelasan. Pengembangan pada daerah C ditahan oleh daerah A, sehingga daerah C mengalami tegangan tekan dan pada daerah A mengalami tegangan tarik. Apabila luasan daerah A lebih luas dari pada daerah C, maka daerah C akan mengalami perubahan bentuk secara plastis sedangkan daerah A mengalami perubahan bentuk secara elastis. Pada waktu pengelasan selesai, terjadilah proses pendinginan yang menyebabkan daerah C akan mengalami penyusutan karena adanya tegangan tekan. Penyusutan pada daerah C akan ditahan oleh daerah A, sehingga pada daerah C akan terjadi tegangan tarik yang diimbangi oleh tegangan tekan pada daerah A.

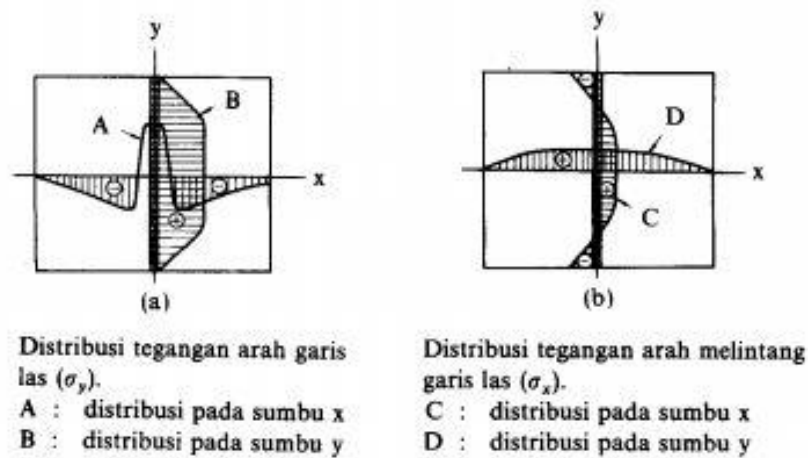


Gambar 2. 1 Ilustrasi Terbentuknya Tegangan Sisa (Wiryosuwarto, 2000)

B. Distribusi Tegangan Sisa

Distribusi tegangan sisa sangat bergantung pada jenis dan bentuk lasan. Apabila proses pengelasan pada material berbentuk pelat dengan menggunakan pengelasan tumpul, garis lasan arah memanjang (*longitudinal*) akan mencapai batas kekuatan luluh (*yield strength*) pada garis las dan kemudian menurun mencapai nol pada ujung pelat. Sedangkan pada arah melintang (*transversal*), garis las terjadi

keseimbangan antara tegangan tarik dan tegangan tekan yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Distribusi Tegangan Sisa pada Sambungan Las Tumpul
(Wiryosuwarto, 2000)

C. Pengukuran Besarnya Tegangan Sisa

Untuk mengetahui besarnya tegangan sisa pada proses pengelasan dapat dilakukan dengan cara menghitung besarnya regangan sisa yang terjadi dengan menggunakan *Hukum Hooke*. Sedangkan besarnya regangan sisa dapat diperoleh dari perubahan panjang material sebelum dan sesudah dipotong. Pengukuran tersebut dilakukan untuk mendapatkan regangan sisa yang terjadi pada material. Dalam *Hukum Hooke* dinyatakan bahwa perubahan ukuran tersebut disebabkan oleh adanya tegangan, sehingga besarnya tegangan sisa dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \quad (2.1)$$

dimana,

E = modulus elastisitas

σ = tegangan sisa yang terjadi

Δl = perubahan panjang sebelum dan sesudah dipotong

l = panjang sebelum dipotong

Dalam hal terjadinya tegangan sisa dengan dua dimensi, menurut Wiryosumarto (2000) dapat dihitung menggunakan rumus berikut.

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) \quad (2.2)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) \quad (2.3)$$

dimana,

σ_x = tegangan sisa tegak lurus garis las

σ_y = tegangan sisa searah garis las

ν = *poisson ratio*

ε_x = regangan sisa tegak lurus garis las

ε_y = regangan sisa searah garis las

D. Pengurangan Tegangan Sisa

Dalam pengelasan tegangan sisa terjadi karena adanya penyusutan pada waktu pendinginan setelah pengelasan. Besarnya tegangan sisa yang terjadi dapat dikurangi dengan dua cara yaitu penanganan sebelum pengelasan dan setelah pengelasan. Untuk penanganan sebelum pengelasan, besar tegangan sisa dapat dikurangi dengan cara mengurangi besarnya masukan panas dan banyaknya logam lasan yang dilaksanakan dengan memperkecil sudut alur dari kampuh dan memperkecil celah akar pada las tumpul. Selain itu, untuk mengurangi tegangan sisa sebelum pengelasan bisa dikurangi dengan cara menentukan urutan pengelasan yang baik. Adapun pengurangan tegangan sisa setelah pengelasan bisa dikurangi dengan melakukan metode PWHT (Pos Weld Heat Treatment).

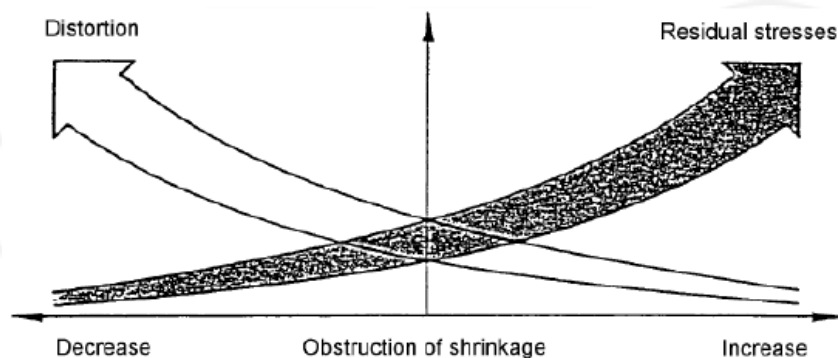
PWHT (Pos Weld Heat Treatment) adalah bagian dari proses *heat treatment* yang bertujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang terbentuk setelah proses weldingan selesai. Material terutama *carbon steel* aka mengalami perubahan struktur dan grain karena *effect* dari pemanasan dan pendinginan. Struktur yang tidak homogen ini menyimpan banyak tegangan sisa yang membuat material tersebut memiliki sifat yang lebih keras namun ketangguhannya lebih rendah. Menurut (Arifin, 2016) pengaruh dari perlakuan PWHT terhadap sifat mekanis yaitu:

- Menurunkan tegangan tarik
- Meningkatkan *ductility*

- Menurunkan hardness level
- Memperbaiki tingkat keluaran hydrogen yang berdifusi dari logam las.
- Melunakkan area *heat affected zone* (HAZ) dan meningkatkan ketangguhan.
- Meningkatkan kestabilan dimensi selama proses *machining*.
- Menurunkan dampak terhadap pengerjaan dingin.

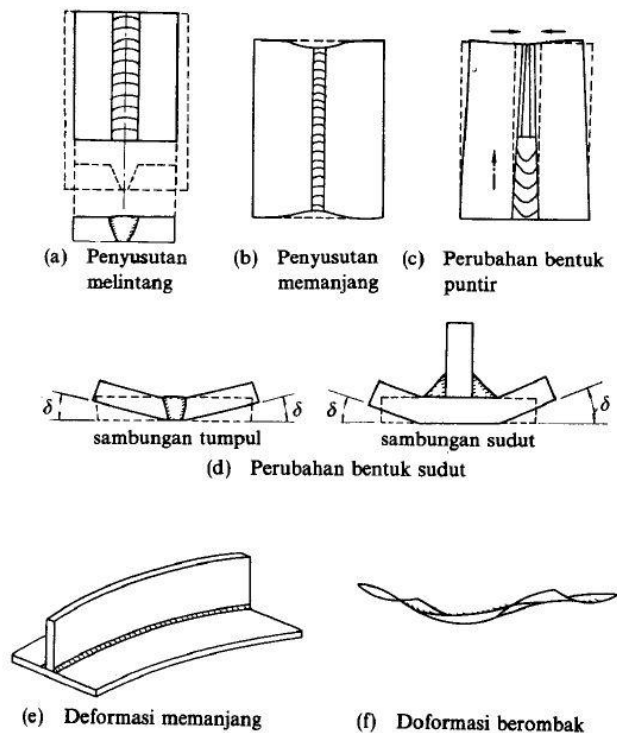
2.2.2 Distorsi Pada Pengelasan

Dalam proses pengelasan, tegangan sisa dan distorsi memiliki keterkaitan yang sangat erat. Proses pemanasan dan pendinginan dalam keseluruhan proses pengelasan mengakibatkan adanya regangan antara logam induk (*Base Metal*) dan logam las (*Weld Metal*). Peregangannya yang terjadi tersebut mengakibatkan adanya tegangan dalam material yang menyebabkan terjadinya *buckling* maupun *bending*. Perubahan bentuk (*buckling* maupun *bending*) inilah yang disebut dengan distorsi. Tinggi rendahnya tegangan sisa dan distorsi sangat berhubungan dengan tebal material. Apabila tebal materialnya semakin tipis maka tegangan sisa semakin kecil namun distorsi semakin tinggi. Akan tetapi, apabila tebal materialnya semakin tebal maka tegangan sisa semakin tinggi namun distorsi semakin kecil. Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi (Syahroni dan Hidayat, 2012)

Macam-macam distorsi atau perubahan bentuk seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4 dapat dikelompokkan sebagai berikut.

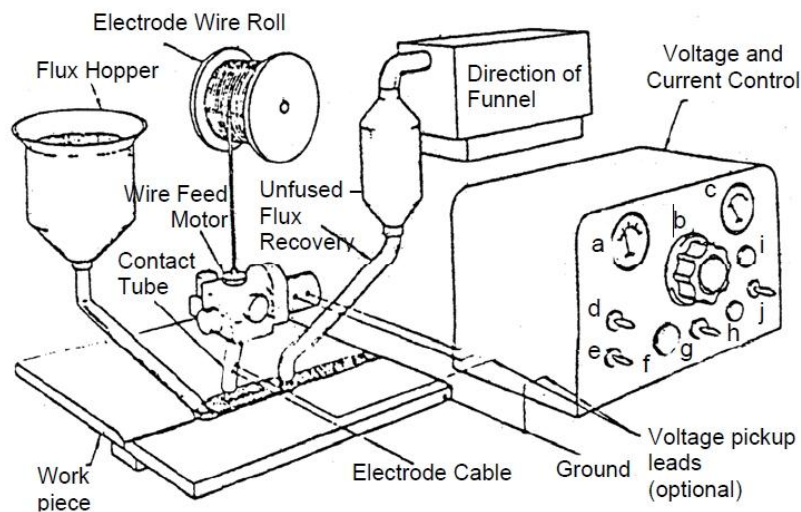


Gambar 2. 4 Macam-macam distorsi dalam pengelasan (Wiryosuwarto, 2000)

1. *Penyusutan melintang*, yaitu penyusutan tegak lurus terhadap garis las.
2. *Penyusutan memanjang*, yaitu penyusutan searah garis las.
3. *Deformasi memanjang*, yaitu perubahan sudut dalam bidang plat yang berkaitan dengan perluasan termal.
4. *Perubahan bentuk sudut*, yaitu perubahan sudut dekat garis las yang disebabkan distribusi termal yang tidak merata terhadap arah ketebalan plat.
5. *Perubahan bentuk puntir*, yaitu perubahan dalam bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap plat.
6. *Deformasi berombak*, yaitu tegangan tekan yang berkaitan dengan panas menyebabkan ketidakstabilan ketika platnya tipis.

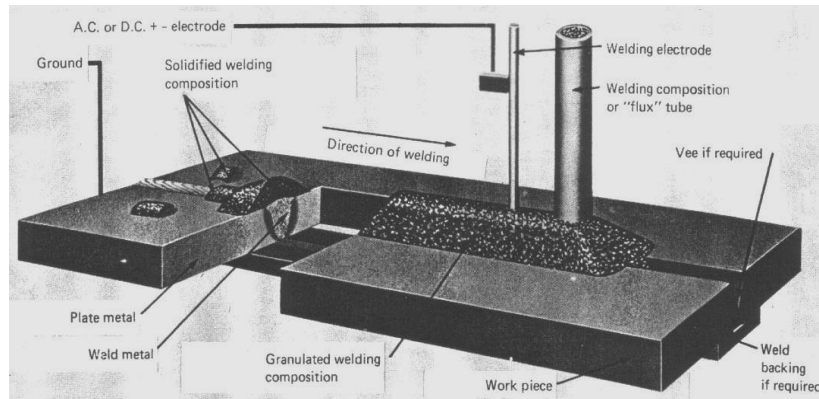
2.2.3 Pengelasan SAW (*Submerged Arc Welding*)

Pengelasan SAW (*Submerged Arc Welding*) atau yang biasa disebut dengan Las Busur Terendam adalah proses pengelasan dimana panas dihasilkan oleh busur listrik yang terjadi akibat tersentuhnya ujung elektrode yang terumpan secara kontinyu dengan logam induk). Selama proses pengelasan busur dan logam cair dilindungi oleh timbunan butiran fluks dan pengelasan dilakukan tanpa tekanan.



Gambar 2. 5 Mesin Las Busur Listrik Terendam Otomatis (Sunaryo, 2008)

Proses pengelasan SAW memiliki komponen-komponen metode las seperti yang ada pada Gambar 2.5. Komponen penyusun jenis pengelasan SAW merupakan komponen yang berjalan secara otomatis. Adapun skema proses pengelasan SAW seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.6, dimana busur listrik dan logam cair dilindungi timbunan butiran fluks. Butiran fluks yang terbakar akan menghasilkan terak yang mengapung di atas logam las karena berat jenisnya yang lebih ringan. Butiran fluks yang tidak terbakar dapat dipakai kembali. Elektrode diumpankan secara otomatis dari gulungan kawat. Busur listrik dikendalikan secara otomatis, sedangkan kecepatan pengelasan dapat dikendalikan secara manual maupun oleh mesin.



Gambar 2. 6 Gambar Skema proses SAW (Syahroni, 2011)

Pengelasan SAW mempunyai keterbatasan dalam posisi pengelasan. Posisi pengelasan hanya dapat dilakukan untuk posisi datar dan horisontal fillet. Hal ini disebabkan karena cairan logam dan cairan terak yang dihasilkan sangat cair dan mudah untuk keluar dari sambungan fillet.

2.2.4 Distribusi Temperatur

A. *Heat Input*

Heat input atau masukan panas merupakan energi yang ditransfer dari elektroda ke logam dasar per unit panjang. *Heat input* sangat berpengaruh terhadap kecepatan pendinginan yang akan berpengaruh juga terhadap sifat mekanik dan struktur metalurgi. Heat input yang berhubungan dengan daerah kampuh las dan daerah HAZ (*heat affected zone*) yang dapat menyebabkan efek negatif pada sifat mekanik. Umumnya *heat input* yang besar menghasilkan penurunan sedikit kekuatan luluh dan kekuatan tarik pada daerah lasan dan ketangguhan berkurang karena adanya interaksi dari ukuran bead dan *heat input*. Distribusi temperatur yang terjadi pada saat proses pemanasan maupun pendinginan tidak merata pada seluruh material.

Adapun untuk menghitung masukan panas atau *Heat Input* menurut Wibowo (2016) dapat dilakukan dengan cara mengalikan tegangan listik atau voltase (V) dari sumber listrik dengan arus listrik atau *Current* (A) sehingga mendapatkan *Power* (W). *Power* tersebut dapat dihitung terhadap tiap tiap satuan kepanjangan garis las dalam tiap satu satuan waktu tertentu yaitu 1 detik, sehingga *Power* tersebut dibagi terhadap kecepatan pengelasan atau *welding speed* atau *travelling speed*. Energi panas yang dihasilkan dari peralatan pengelasan tersebut

tidak 100% mengenai objek pengelasan namun terbuang sebagian ke lingkungan, sehingga *power* yang diperhitungkan terhadap satu satuan kepanjangan garis las tersebut dikalikan terhadap tingkat efisiensi yang bergantung dari jenis pengelasannya. Sehingga *heat input* yang digunakan dalam pengelasan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = \eta \frac{V \cdot I}{v} \quad (2.4)$$

dengan

Q = *Heat Input* (J/mm)

η = *Thermal Eficiency* (%)

V = *Voltage* (V)

I = *Current* (A)

v = *Welding Speed* (mm/sec)

B. Heat Transfer

Dalam proses pemanasan suatu material dengan gradien suhu yang tajam antara suhu mula-mula material dengan suhu pemanasan las akan membentuk suatu distribusi panas hingga keseluruhan bagian material. Perpindahan panas atau *Heat Transfer* secara umum dapat dibedakan menjadi Konduksi, Konveksi dan Radiasi. Akan tetapi, pada proses pengelasan ini, perpindahan panas yang terjadi hanya perpindahan panas secara konduksi dan konveksi. Dimana konduksi adalah perpindahan energi panas yang terdistribusi pada keseluruhan bagian material yang terjadi pada 1 medium atau material yang sama dan konveksi adalah proses melepasnya energi panas dari material maupun panas dari alat las ke lingkungan yaitu udara. Berdasarkan Hukum Fourier, kerapatan aliran panas atau *heat flow density* bergantung dari gradien temperatur yang dikalikan dengan faktor koefisien konduktifitas panas atau dengan kata lain panas yang berpindah mengalir dari bagian material panas menuju bagian yang lebih dingin.

Konduksi panas berdasarkan hukum Fourier dapat dirumuskan,

$$q_x = -K_{xx} \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

dimana:

K_{xx} = Konduktivitas termal arah-x (W/m.K)

T = Temperatur (K)

$\frac{dT}{dx}$ = Gradien temperatur (K/m)

Untuk aliran panas akibat konveksi atau disebut hukum pendinginan Newton dapat dirumuskan,

$$q_h = h(T_s - T_\infty) \quad (2.6)$$

dimana:

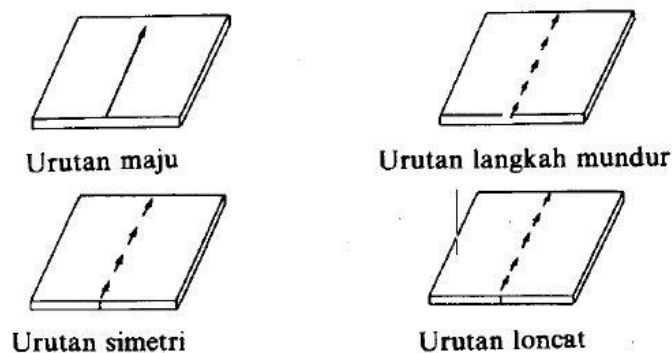
h = koefisien konveksi (W/m².K)

T_s = temperatur pada permukaan benda yang kontak dengan fluida atau sumber panas (K)

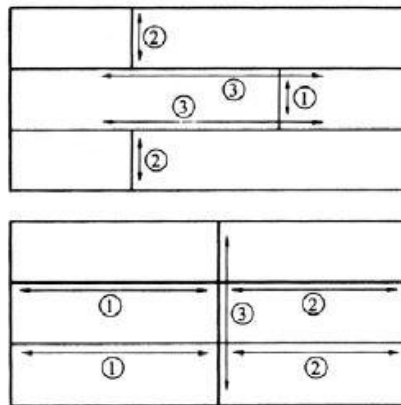
T_∞ = temperatur fluida atau sumber panas (K)

2.2.5 Urutan Pengelasan

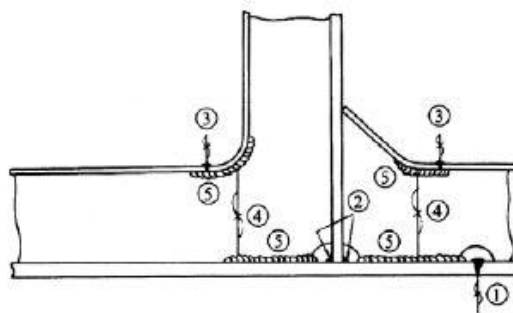
Pekerjaan pengelasan kapal mempunyai peran dan pengaruh terhadap ketelitian akurasi dimensi struktur perakitan, hal ini diakibatkan oleh adanya pengaruh perlakuan panas akibat pekerjaan pengelasan. Masalah ini tak mungkin dihindari, tetapi dapat diperkecil pengaruh panas terhadap penyimpangan akurasi dimensi structural kapal dengan cara menggunakan perencanaan dan persiapan pengelasan yang tepat terhadap method dan prosedur pengelasannya. Akibat perlakuan panas pengelasan pada material menyebabkan penyusutan memanjang dan penyusutan melintang serta angular distorsi, sehingga penyusutan perlu diusahakan dengan cara mengikuti prosedur urutan pengelasan secara umum, seperti pada Gambar 2.7.



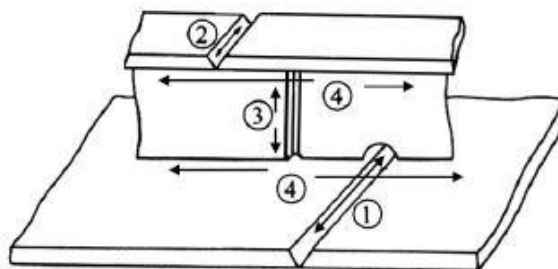
Gambar 2. 7 urutan pengelasan (Wiryosuwarto, 2000)



Gambar 2. 8 Urutan pengelasan pada penyambungan pelat (Sunaryo, 2010)



Gambar 2. 9 Urutan pengelasan pada penyambungan profil (Sunaryo, 2010)



Gambar 2. 10 Urutan pengelasan profil terhadap plat (Sunaryo, 2010)

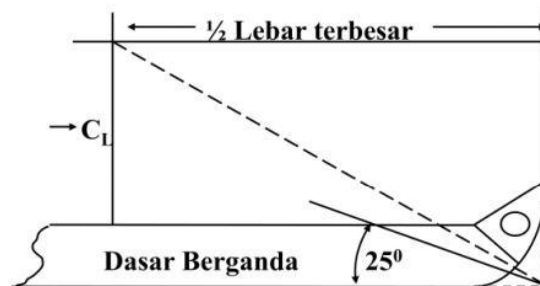
Berdasarkan Gambar 2.8 hingga Gambar 2.10 contoh urutan pengelasan pada plat dalam menentukan urutan pengelasan dapat dilakukan dengan mengikuti beberapa dasar pelaksanaan urutan dengan berpedoman pada (Sunaryo, 2010):

1. Bila dalam satu bidang terdapat banyak sambungan, sebaiknya diusahakan agar penyusutan dalam bidang tersebut tidak terhalang.

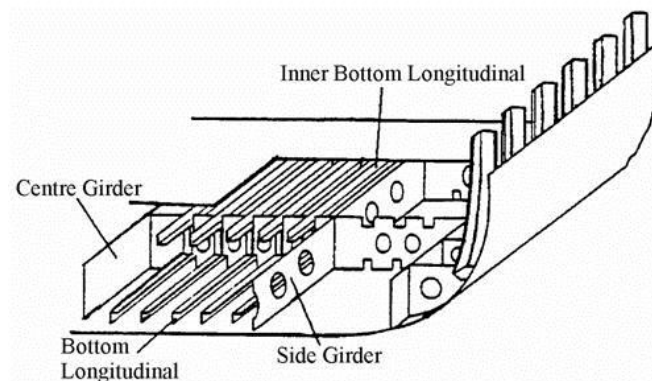
2. Sambungan dengan penyusutan yang terbesar dilas terlebih dahulu dan baru sambungan yang penyusutannya lebih kecil.
3. Pengelasan dilakukan sedemikian rupa sehingga mempunyai urutan yang simetris terhadap sumbu netral dari konstruksi agar gaya-gaya dalam keadaan berimbang.

2.2.6 Dasar Berganda (*Double Bottom*)

Dasar berganda atau *double bottom* adalah bagian dari struktur kapal yang dibatasi, pada bagian bawah oleh kulit kapal bagian bawah (*bottom shell plating*), bagian atas oleh plat dasar dalam (*inner bottom plating*), bagian samping oleh *Bilge Plate*, bagian depan oleh sekat kedap air terdepan / sekat pelanggaran (*collision bulkhead*), bagian belakang oleh sekat kedap air paling belakang / sekat ceruk belakang (*after peak bulkhead*).



Gambar 2. 11 Konstruksi dasar berganda atau *double bottom* (Tritton, 2008)



Gambar 2. 12 Bagian-bagian yang ada pada *double bottom* (Tritton, 2008)

Adapun kegunaan dari dasar berganda atau double bottom yaitu apabila kapal kandas dan mengalami kebocoran, masih ada dasar yang kedap air ; sebagai ruangan muatan cair, air tawar, bahan bakar, ballas dll ; membantu stabilitas kapal dan juga untuk menambah kekuatan melintang kapal.

2.2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk memperhitungkan persamaan *differential* dengan suatu kondisi batas tertentu. Hal ini tidak dapat atau sulit diselesaikan dengan solusi analisa matematis. Metode elemen hingga digunakan dengan cara membagi suatu struktur menjadi bagian-bagian yang lebih kecil (*meshing*) sehingga perhitungan struktur secara global dapat dihitung melalui reaksi yang terjadi pada tiap-tiap elemen kecil.

Dalam metode elemen hingga terdapat dua pendekatan yang biasa digunakan, yaitu metode gaya dan metode displasmen atau kekakuan. Untuk kebanyakan *software* komputasi metode elemen hingga seperti ANSYS, metode yang lebih digunakan adalah metode displasmen karena formulasinya untuk masalah-masalah analisis struktur bisa lebih sederhana. Menurut Muhammad (2016) dalam melakukan simulasi metode elemen hingga menggunakan software komputasi tersebut secara umum bekerja dalam 8 tahap, yaitu:

1. Pendiskritan dan Pemilihan Jenis Elemen

Pendiskritan dan pemilihan jenis elemen merupakan tahap yang sangat penting karena dapat menentukan keakuratan dan ketelitian dari suatu hasil analisa. Jenis elemen harus dipilih sesuai analisa agar dapat menghasilkan hasil analisa yang mendekati keadaan sebenarnya. Dalam memilih ukuran ketika proses *meshing* harus sesuai dengan keadaan struktur yang sebenarnya. Semakin kecil ukuran *meshing* akan membutuhkan kapasitas hardisk dan memori yang cukup besar. Hal ini karena input data *software* semakin banyak sehingga untuk proses akan lebih berat. Penggunaan *Meshing* untuk ukuran elemen kecil biasanya untuk analisa dengan kondisi yang mengalami perubahan drastis. Sedangkan untuk *meshing* ukuran elemen besar digunakan untuk analisa yang perubahannya cenderung konstan.

Pemilihan jenis elemen yang akan digunakan berdasarkan dari hasil penelitian terdahulu yaitu elemen *Shell*. Menurut Wibisono (2017) untuk tingkat kecepatan running dalam suatu analisa *thermal*, menggunakan elemen *shell* memiliki *running time* yang lebih cepat dibandingkan elemen yang lain, yaitu elemen *solid*.

2. Pemilihan fungsi displasemen

Menentukan fungsi displasemen yang didefinisikan pada tiap elemen dengan menggunakan nilai parameter di tiap node elemen. Fungsi yang digunakan adalah fungsi polinomial, linear kuadratik, kubik, atau deret trigonometri.

$$\{w\} = [N]\{u\} \quad (2.7)$$

3. Definisi hubungan regangan-displasemen dan tegangan-regangan

Hubungan antara regangan-displasemen dan antara tegangan-regangan dibutuhkan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen hingga. Kemampuan untuk mendefinisikan kelakuan atau sifat material secara tepat adalah hal yang sangat penting untuk mendapatkan hasil yang dapat diterima. Hubungan tegangan-regangan nanti akan digunakan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen.

$$\sigma = D \varepsilon^{el} \quad (2.8)$$

dan

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th} \quad (2.9)$$

dimana:

ε : regangan total

ε^{el} : regangan elastis

ε^{th} : regangan termal

D : kekakuan material

Vector thermal strain untuk isotropik medium dengan suhu yang tergantung pada koefisien ekspansi termal, dengan rumus:

$$\varepsilon^{th} = \Delta T \alpha(T) \quad (2.10)$$

ΔT adalah perbedaan antara *reference temperature* dengan *actual temperature*.

4. Penentuan matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen

Untuk menentukan matriks kekakuan dan persamaan elemen dapat digunakan metode keseimbangan langsung dan metode energi dengan menggunakan prinsip energi potensial minimum.

$$\delta U = \delta P \quad (2.11)$$

Dimana:

U : *internal strain energy (internal work)*

P : *external work*, seperti efek inersia

δ : *virtual operator*

Virtual strain energy dapat ditulis:

$$\delta = \int [\delta \varepsilon]^T \{\sigma\} dV \quad (2.12)$$

Dimana:

ε : vektor regangan

σ : vektor tegangan

V : volumen elemen

Substitusi persamaan (3.8) dan (3.9) untuk memperoleh δU

$$\delta U = \int (\{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon^{th}\}) dV \quad (2.13)$$

Strain yang dikaitkan dengan nodal displasmen:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\} \quad (2.14)$$

Untuk displasmen konstan, energi regangan *virtual* adalah:

$$\delta U = \{\delta \varepsilon\}^T \int [B]^T [D] [B] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV \quad (2.15)$$

External work karena gaya inersia diformulasikan sebagai:

$$\delta P = - \int \{\delta w\}^T \{F^a\} dV \quad (2.16)$$

dimana,

w : vektor displasmen dari general point

$\{F^a\}$: vektor *acceleration force*

Berdasarkan hukum gerak Newton II:

$$\{F^a\} = \rho \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{w\} \quad (2.17)$$

Jika displasmen dengan elemen dihubungkan pada nodal displasmen:

$$\{w\} = [N]\{u\} \quad (2.18)$$

Persamaan (3.16) dapat ditulis kembali menjadi:

$$\delta P = -\{\delta u\} \rho \int \{N\}^T [N] dV \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{u\} \quad (2.19)$$

Lalu substitusi persamaan (2.15) dengan persamaan (2.19) , menjadi:

$$\{\delta \varepsilon\}^T \int [B]^T [D] [B] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV = -\{\delta u\} \rho \int \{N\}^T [N] dV \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{u\} \quad (2.20)$$

$\{\delta u\}^T$ vektor adalah sebuah displasmen umum yang sebenarnya, sebuah kondisi diperlukan untuk memenuhi persamaan displasmen konstan dikurangi sampai:

$$[K_c] - \{F_c^{th}\} = [M_c]\{\ddot{u}\} \quad (2.21)$$

Dimana,

$$[K_c] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad \rightarrow \text{Matriks kekakuan elemen} \quad (2.22)$$

$$\{F_c^{th}\} = \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV \quad \rightarrow \text{Vektor beban termal elemen} \quad (2.23)$$

$$\{M_c\} = \rho \int [N]^T [N] dV \quad (2.24)$$

5. Penggabungan persamaan elemen dengan penentuan kondisi batas

Persamaan elemen dalam tahap sebelumnya yaitu tahap empat digabungkan menggunakan metode kekakuan langsung untuk mendapatkan persamaan global keseluruhan struktur. Matriks kekakuan global yang digunakan merupakan matriks singular, sehingga harus ditentukan kondisi batasnya untuk menghindari singularitas.

6. Penyelesaian derajat kebebasan yang belum diketahui

Untuk mendapatkan besaran yang belum diketahui dari tahap selanjutnya dengan menggunakan metode eliminasi (misal metode Gauss) atau metode iterasi (misal metode Gauss-Seidel).

7. Penentuan regangan dan tegangan elemen

Besaran yang didapat pada tahap sebelumnya yaitu tahap enam (misal displasmen) digunakan untuk menentukan tegangan dan regangan di elemen.

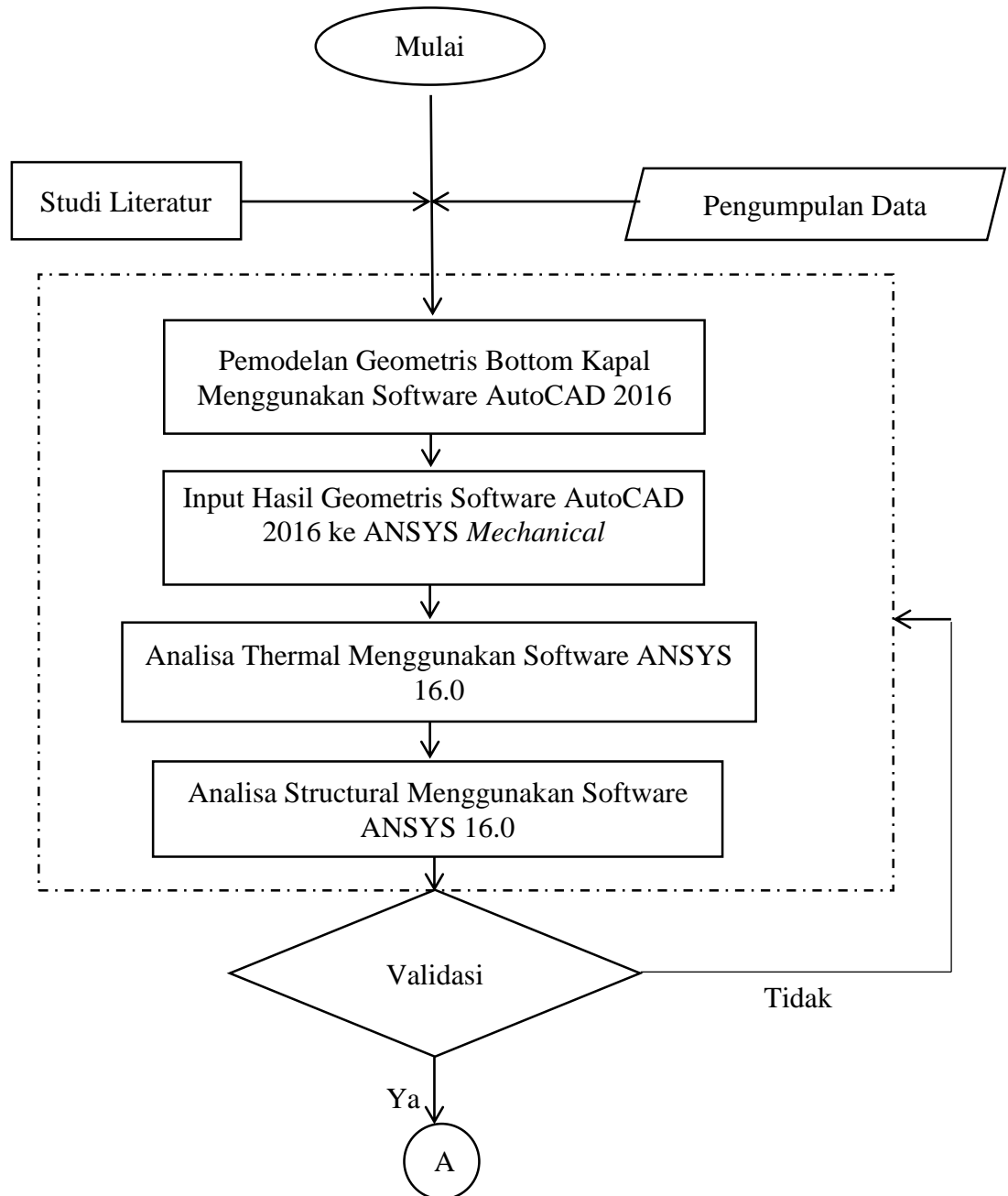
8. Penampilan hasil

Hasil yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk grafis dan ilustrasi efek pembebanan sehingga akan mempermudah pembacaan hasil.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Untuk mempermudah proses pelaksanaan penelitian dalam Tugas Akhir ini, maka disusunlah alur penelitian sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (Lanjutan)

3.2 Prosedur Penelitian

Dalam menjawab rumusan permasalahan yang sesuai dengan tujuan, dilakukan proses penelitian yang sesuai dengan prosedur atau langkah-langkah yang dilaksanakan. Prosedur tersebut dimulai dengan studi literatur untuk mendapatkan arah jawaban atas permasalahan yang telah didapat, prosedur analisis, dan penggunaan software hingga mendapatkan kesimpulan. Prosedur penelitian tersebut digambarkan pada Gambar 3.1

1. Studi Literatur

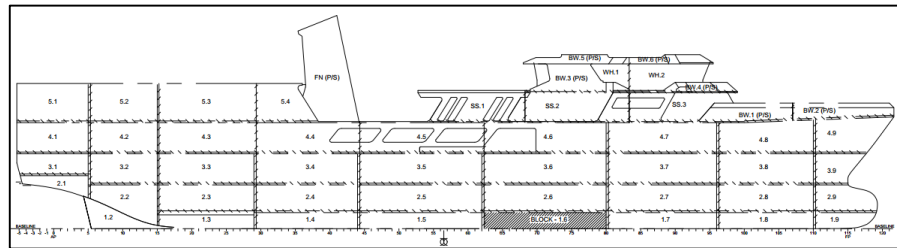
Pada tahap ini berisi tentang kegiatan mencari, mengkaji, dan mengumpulkan materi serta informasi yang relevan yang dapat menjadi acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Seperti referensi beberapa buku dan tugas akhir terdahulu yang berhubungan pengaruh variasi urutan pengelasan terhadap besarnya tegangan sisa dan distorsi pada proses pengelasan dan

juga dalam memilih elemen yang dipakai untuk analisis numerik menggunakan metode elemen hingga.

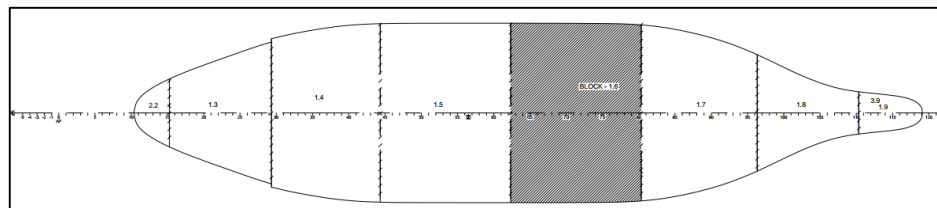
2. Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah mengacu pada data Kapal Survey Geomarin IV milik Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Pusat Penelitian Dan Pengembangan Geologi Kelautan.

Data yang didapatkan adalah sebagai berikut:



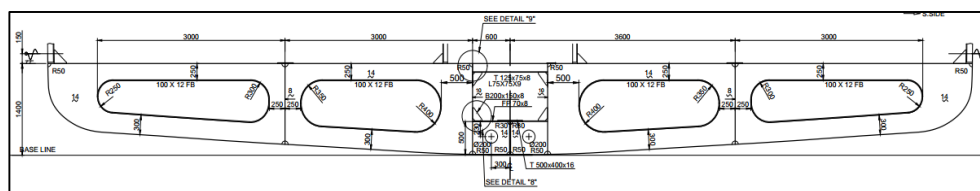
Gambar 3. 2 Tampak Samping Blok Kapal Survey Geomarin IV



Gambar 3. 3 Tampak Atas Blok Kapal Survey Geomarin IV

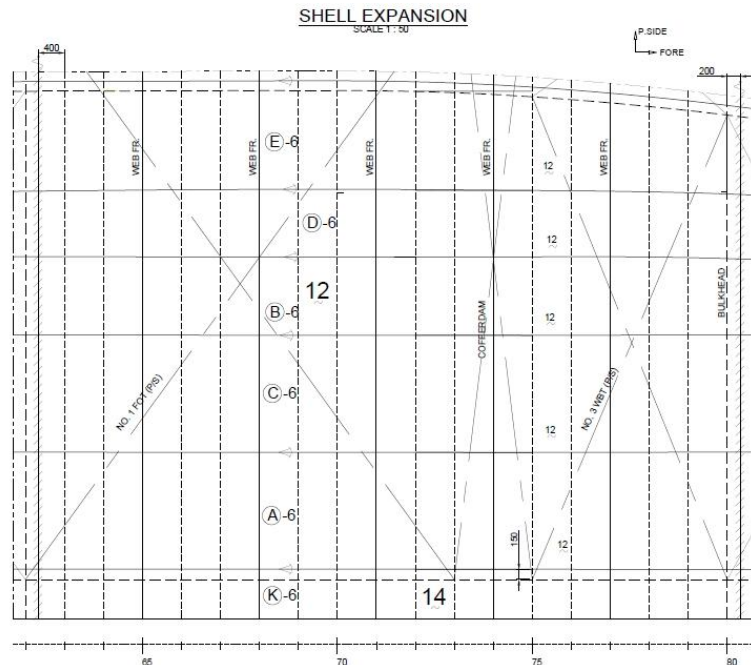
Berdasarkan Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 blok yang dipakai untuk analisis tegangan sisa dan distorsi berada pada Blok 1.6 karena pada bagian tersebut memiliki tegangan struktural yang paling kritis.

Pada Gambar 3.4 merupakan detail salah satu *frame double bottom* yang ada pada Kapal Survey Geomarin IV.



Gambar 3. 4 Tampak melintang *double bottom* pada *frame* Kapal Survey Geomarin IV

Terdapat 3 bagian utama dari *double bottom*, yaitu *inner bottom*, *bottom* dan *bilge keel*. Dan bagian *double bottom* yang menjadi perhatian khusus dalam penelitian ini adalah pada bagian *bottom* Kapal Survey Geomarin IV.



Gambar 3. 5 Shell Expansion Blok 1.6 Kapal Survey Geomarin IV (Citra Mas, 2016)

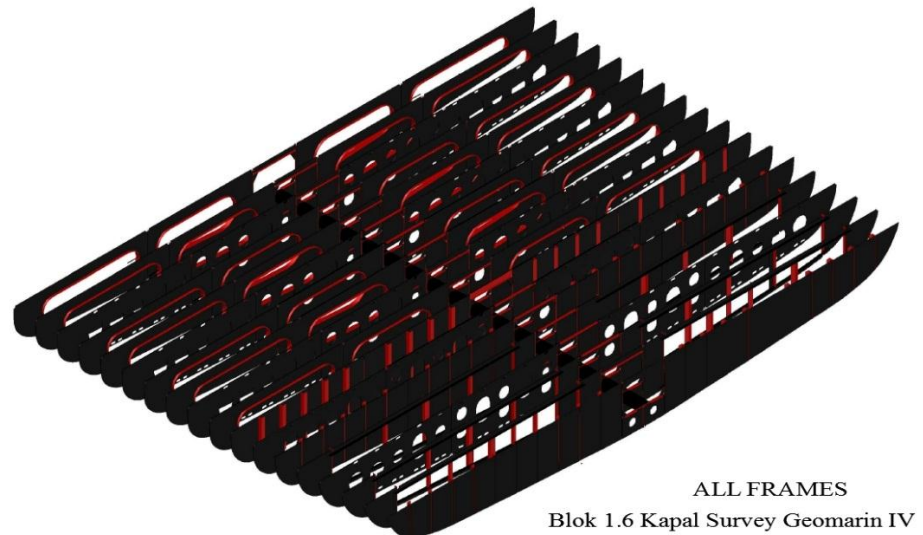
Dan untuk mengetahui detail dimensi yang akan dilas di *bottom* kapal, telah tersedia pada gambar Shell Expansion, seperti yang ada pada Gambar 3.4.

3. Permodelan Geometris *Bottom* Kapal Menggunakan Software AutoCAD 2016

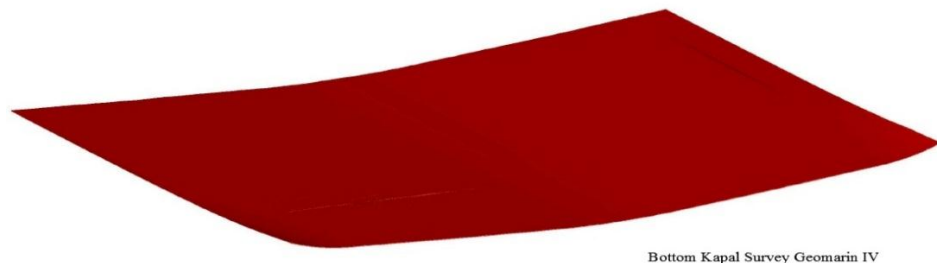
Proses pembuatan model konstruksi *bottom* merupakan tahapan paling awal dalam analisis yang dilakukan dalam penelitian ini. Pembuatan model dibuat secara 3 dimensi sesuai dengan data dimensi yang didapat dari CV. Citra Mas. Dalam permodelan konstruksi *bottom* ini menggunakan Software AutoCAD 2016. Bagian konstruksi Kapal Survey Geomarin IV yang digunakan untuk dianalisa adalah Blok 1.6 karena berdasarkan referensi data yang di peroleh pada bagian tersebut memiliki tegangan struktural yang tinggi dan kritis. Blok 1.6 Kapal Survey Geomarin IV terdiri

dari 18 *frame* yang terdiri dari tiga jenis *floor* yaitu *solid floor*, *open floor*, dan *watertight floor*.

Adapun hasil permodelan seluruh *frame* di Blok 1.6 seperti yang ada pada Gambar 3.6 dan hasil permodelan *bottom* pada Gambar 3.7.



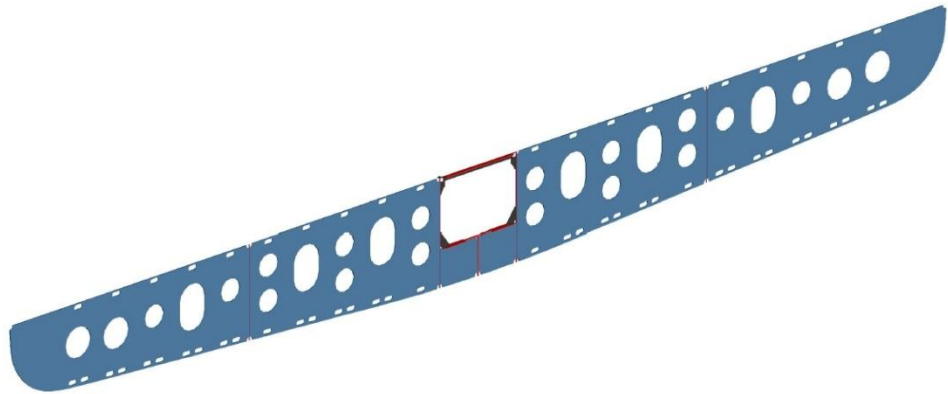
Gambar 3. 6 Permodelan *Frames* yang ada pada Blok 1.6 Kapal Survey Geomarin IV



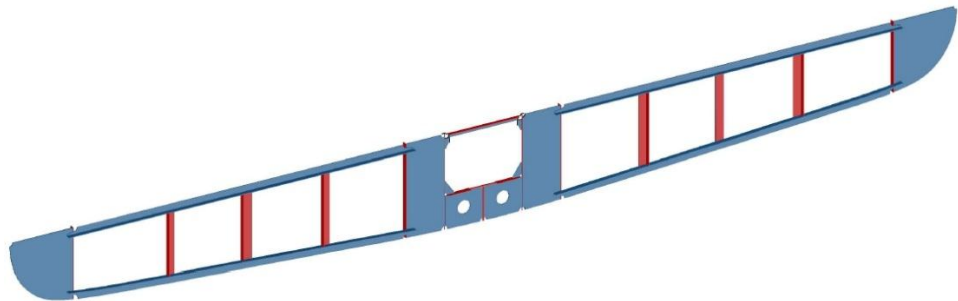
Gambar 3. 7 Permodelan *Bottom* yang ada pada Blok 1.6 Kapal Suirvey Geomarin IV

Setiap Kapal pasti memiliki berbagai macam frame yang terdiri beberapa jenis *floor*, seperti pada Kapal Survey Geomarin IV memiliki 3 jenis *floor*, yaitu *solid floor*, *open floor*, dan *watertight floor*.

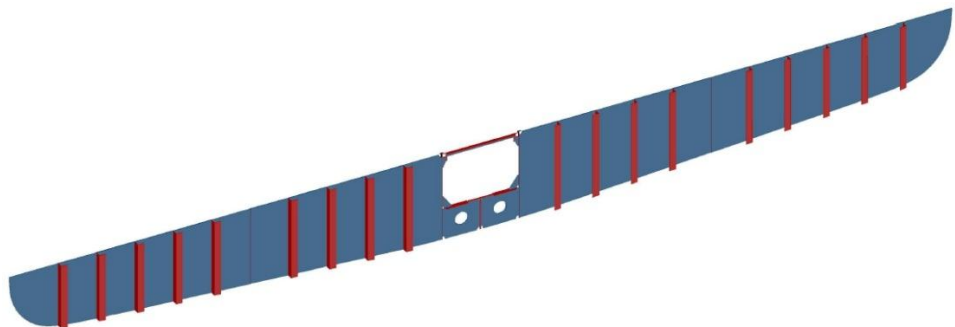
Adapun permodelan dari berbagai macam *floor* tersebut seperti yang ada pada Gambar 3.8, 3.9, dan 3.10 secara berurutan.



Gambar 3. 8 *Floor* dengan Jenis *Solid Floor*



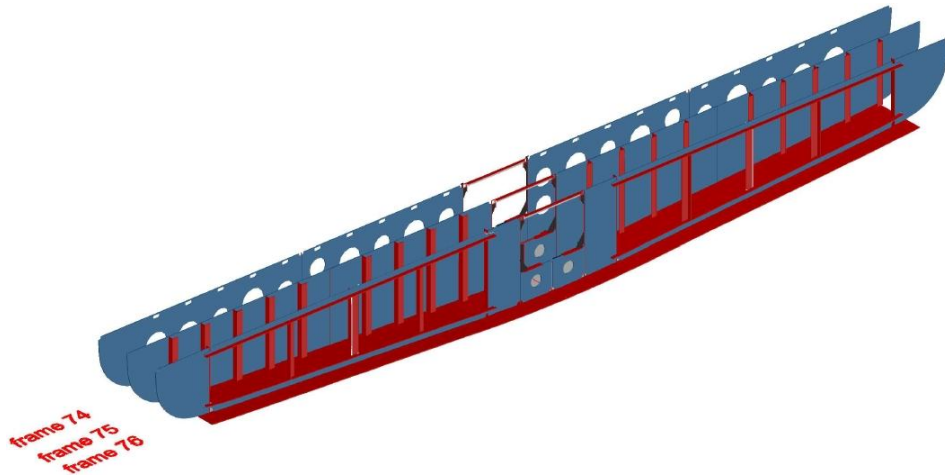
Gambar 3. 9 *Floor* dengan Jenis *Open Floor*



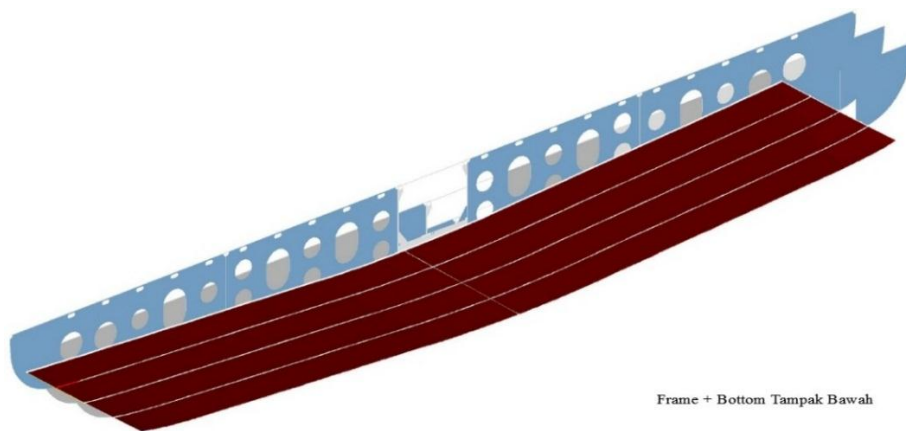
Gambar 3. 10 *Floor* dengan Jenis *Watertight Floor*

Dalam penelitian ini, *frame* yang digunakan untuk dianalisa adalah frame 74, 75, dan 76. Ketiga *frame* tersebut memiliki jenis *floor* yang berbeda satu sama lain. Karena untuk mengetahui penyebaran panas, besarnya tegangan sisa, dan distorsi yang terjadi pada 3 jenis *frame* yang berbeda.

Adapun tampak atas dan tampak bawah permodelan frame 74, 75, 76 dan *bottom* seperti yang tertera pada Gambar. 3.11 dan 3.12 secara berurutan.



Gambar 3. 11 Tampak Atas *Frame* 74, 75, dan 76 beserta *bottom*

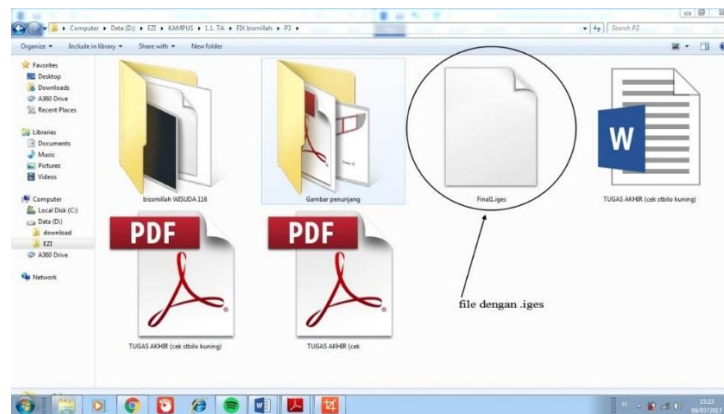


Gambar 3. 12 Tampak Bawah *Frame* 74, 75, dan 76 beserta *bottom*

4. *Input Hasil Geometris Software AutoCAD 2016 ke ANSYS 16.0*

Hasil dari pemodelan geometris pada *software AutoCAD 2016* diinputkan pada *software ANSYS 16.0*. Hasil inputan bentuk geometris pada ANSYS 16.0 harus tampak sama dengan bentuk geometris *bottom* kapal yang sesungguhnya. Perpindahan hasil permodelan geometris dari AutoCAD ke ANSYS dapat dilakukan cara dengan meng-*export* data

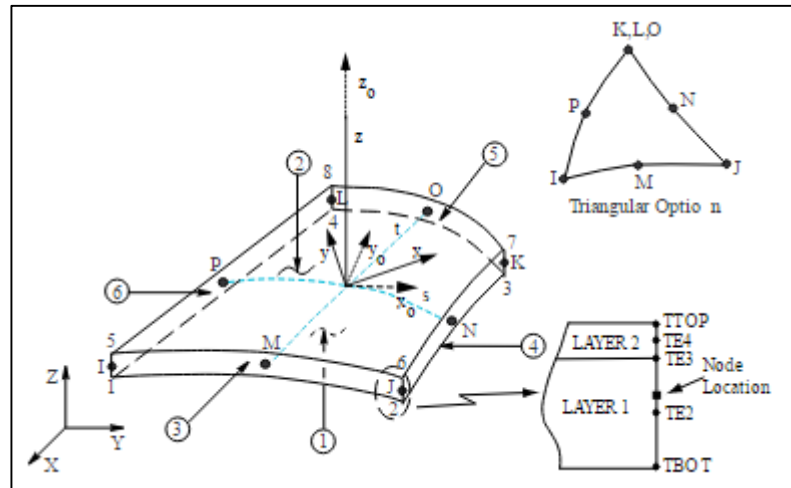
geometris menggunakan fitur *export* yang terdapat pada AutoCAD 2016. Hasil output data geometris yang akan dipindahkan ke ANSYS 16.0 memiliki ekstensi valid, seperti .iges, .igs, dan .sat. Adapun penelitian ini ekstensi yang digunakan yaitu .iges karena sudah sangat umum digunakan dan mudah apabila akan melanjutkan ke pengoperasian analisa selanjutnya. Contoh hasil *File Output* menggunakan ekstensi .iges seperti yang ada pada Gambar 3.13.



Gambar 3. 13 Hasil *File Output* dengan Ekstensi .iges

5. Analisa Thermal Menggunakan Software ANSYS 16.0

Setelah bentuk geometri yang akan dianalisa sudah sesuai, maka dilakukan pembagian struktur menjadi bentuk elemen-elemen kecil atau yang biasa disebut *meshing*. Adapun jenis elemen yang dipakai pada Tugas Akhir ini adalah elemen *shell*. Selain karena elemen Shell memiliki *running time* yang lebih cepat apabila dibandingkan dengan elemen Solid (Wibowo, 2017), elemen Shell juga mampu menghasilkan kesalahan (error) yang relatif lebih kecil daripada elemen-elemen jenis lain. Dan untuk penelitian ini jenis elemen yang digunakan untuk analisis thermal yaitu SHELL132. Menurut user manual ANSYS, SHELL132 merupakan elemen tiga dimensi yang memiliki *in-plane thermal conductivity capabilities* sehingga mampu mensimulasikan perpindahan yang disebabkan oleh momen *bending* (gerakan rotasi). Untuk detail elemen SHELL 132 seperti yang ada pada Gambar 3.14 dibawah ini.



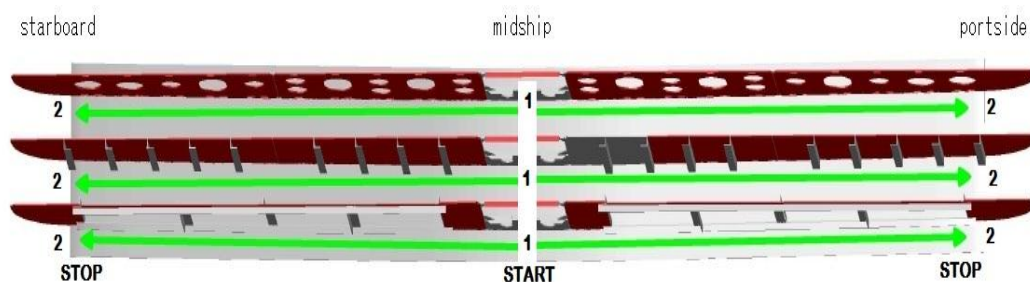
Gambar 3. 14 Detail Elemen SHELL 132 pada ANSYS (User Manual ANSYS)

Berikutnya dimasukkan data-data properti material. Selanjutnya dilakukan pembebanan panas secara *transient* sesuai dengan variasi alur pengelasan.

Alur pengelasan yang akan dilakukan ada 3 jenis, yaitu:

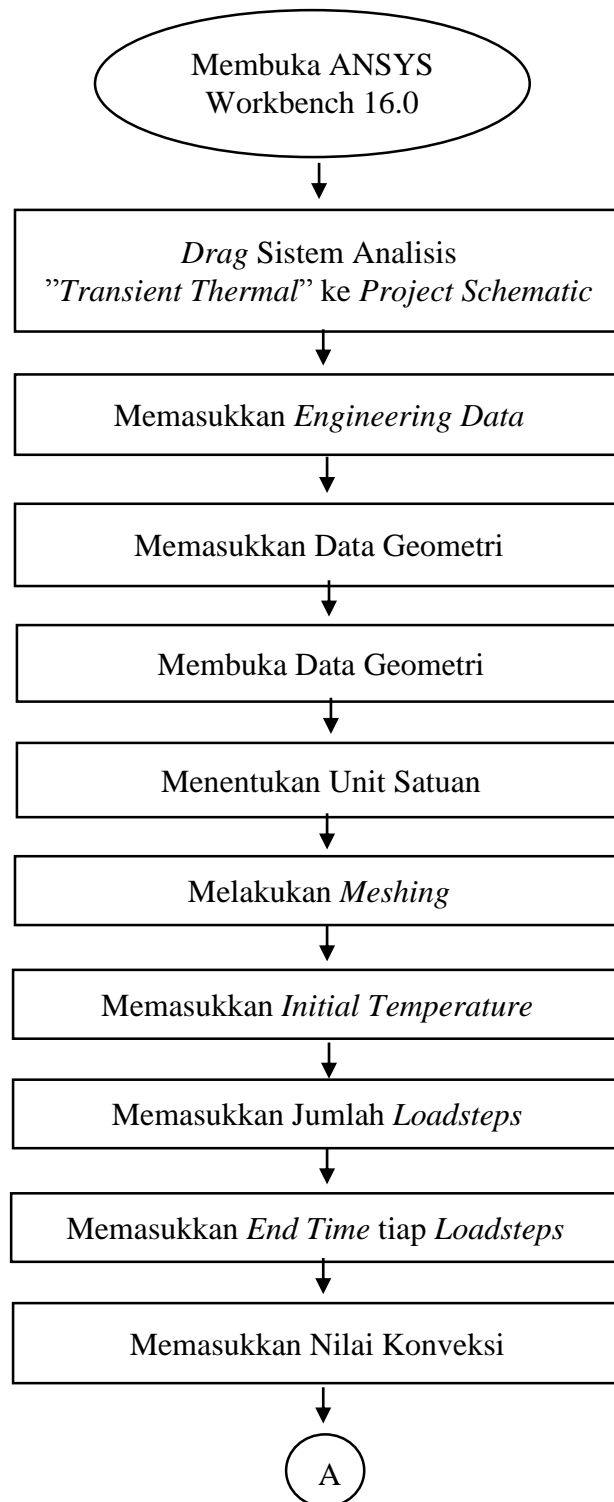
- Dari starboard ke arah portside di ketiga frame secara bersamaan
- Dari midship ke arah starboard dan portside bersamaan di ketiga frame
- Dari starboard ke arah portside di ketiga frame secara bergantian

Detail salah satu urutan pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini seperti yang ada pada Gambar 3.15 dibawah ini.

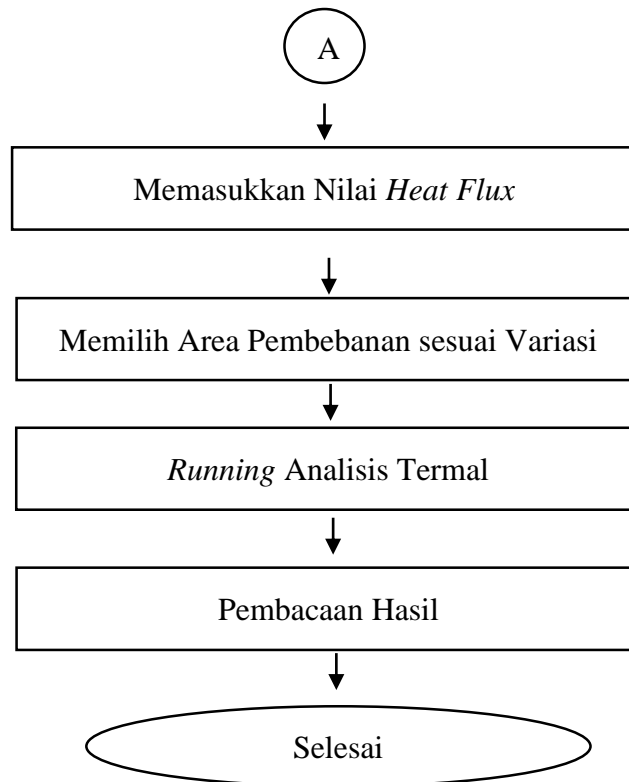


Gambar 3. 15 Urutan Pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini

Berikut adalah skema diagram alir untuk analisis *transient thermal* yang diperlihatkan pada Gambar 3.16.



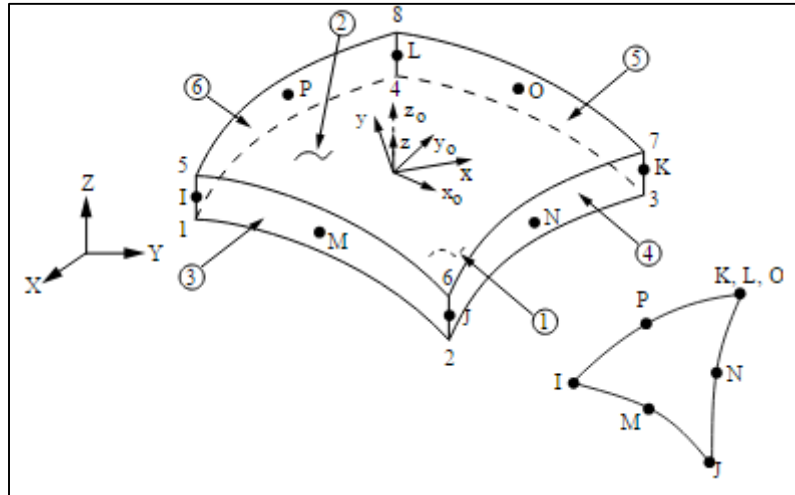
Gambar 3. 16 Diagram Alir untuk Analisis Thermal



Gambar 3.16 Diagram Alir untuk Analisis Thermal (Lanjutan)

6. Analisa *Structural* Menggunakan Software ANSYS 16.0

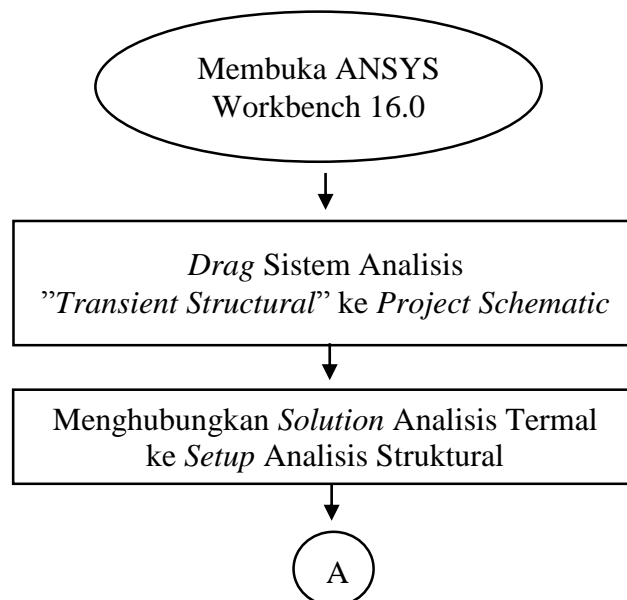
Hasil dari analisa *transient thermal* adalah regangan *thermal*. Regangan *thermal* tersebut dapat diubah menjadi regangan struktural, jenis elemen *shell* yang digunakan diusahakan harus ekivalen dengan elemen yang digunakan ketika analisis *transient thermal*, sehingga bentuk elemen SHELL132 berubah menjadi SHELL281. Berdasarkan *User Manual ANSYS* elemen SHELL 281 merupakan elemen *shell* tiga dimensi dengan 8 titik nodal yang memiliki kemampuan *bending* serta mampu menerima beban *in-plane* maupun normal. Setiap satu titik nodal memiliki 6 derajat kebebasan yaitu terdiri dari 3 rotasi dan 3 translasi. Karena pertimbangan ini maka elemen yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah elemen SHELL 281. Adapun detail bentuk SHELL 281 seperti yang ada pada Gambar 3.17 dibawah ini.



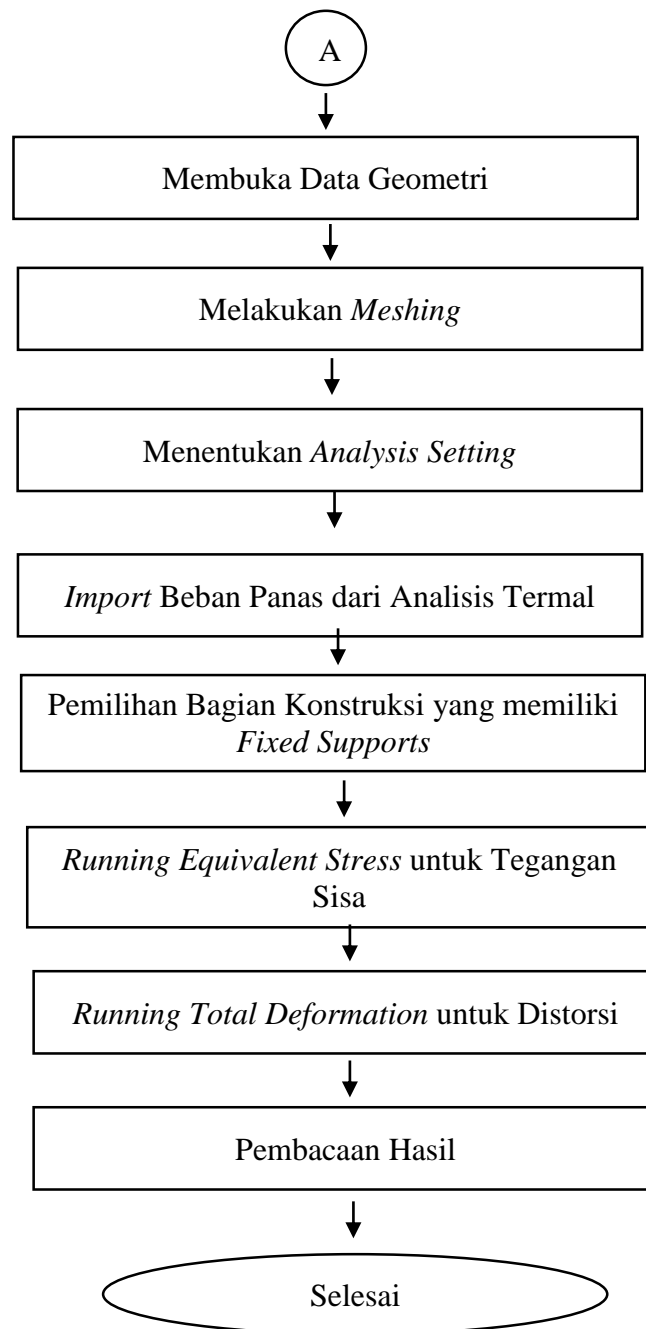
Gambar 3. 17 Detail Elemen SHELL 281 pada ANSYS (User Manual ANSYS)

Struktur tersebut lantas diberikan beban yang sesuai dengan data yang ada, kemudian dirunning untuk mendapatkan regangan struktural dan juga bentuk distorsi yang dialami struktur.

Dari regangan struktur tersebut dapat diperoleh tegangan sisa dan distorsi. Berikut adalah skema diagram alir analisis *transient* struktural pada ANSYS yang diperlihatkan pada Gambar 3.18.



Gambar 3. 18 Diagram Alir untuk Analisis Struktural



Gambar 3. 18 Diagram Alir untuk Analisis Struktural (lanjutan)

7. Validasi Model

Validasi dilakukan pada distribusi panas, distribusi tegangan sisa dan distribusi distorsi berdasarkan referensi yang digunakan yaitu Chen (2015) dan Wibowo (2016). Pada penelitian ini, jenis material yang digunakan adalah ASTM A131 Grade AH36 yang memiliki *yield stress* sebesar 350 Mpa. Sehingga untuk pengambilan keputusan sebagai variasi urutan pengelasan terbaik dan efektif yaitu dengan memilih variasi urutan pengelasan yang memiliki tegangan sisa mendekati *yield stress*.

8. Kesimpulan

Hasil analisa dari tugas akhir ini adalah besar tegangan sisa dan distorsi dari struktur *bottom* Kapal Survey Geomarin IV serta pengaruh dari variasi urutan pengelasan terhadap besarnya tegangan sisa dan distorsi.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Beban *Heat Flux*

Dalam menentukan besarnya *heat input* yang akan diberikan pada model pengelasan, faktor utama yang harus diperhatikan adalah parameter pengelasan yang akan digunakan. Pada penelitian ini parameter beserta nilainya digunakan untuk pengelasan di 3 *frame*, karena panjang area pengelasan di konstruksi *bottom* ketiga *frame* tersebut memiliki panjang yang sama. Parameter beserta nilainya yang digunakan adalah sebagai berikut:

Proses	: SAW (<i>Submerged Arc Welding</i>)
Jenis lasan	: <i>Fillet welded T-Joint</i>
Arus	: 525 A
Voltase	: 28 V
Kecepatan las	: 10,16 mm/s (24 in/min)
Diameter Elektroda	: 3,96875 mm (5/32 in)
<i>Heat efficiency</i>	: 0,91

Pada penelitian ini material yang dipakai yaitu Baja ASTM A131 GRADE AH36. Berdasarkan data komponen element material tersebut, untuk jenis elektrode yang dipakai pada penlitian ini yaitu tipe Elektrode EM13K. Adapun komposisi kimia dari tipe elektrode EM13K seperti yang dijelaskan Gambar 4.1 di bawah ini:

Electrode Classification	CHEMICAL COMPOSITION (WT %) ^{a,b}					
	C	Mn	Si	S	P	Cu ^c
Low-manganese steel electrodes						
EL8	0.10	0.25/0.60	0.07	0.035	0.035	0.35
EL8K	0.10	0.25/0.60	0.10/0.25	0.035	0.035	0.35
EL12	0.05/0.15	0.25/0.60	0.07	0.035	0.035	0.35
Medium-manganese steel electrodes						
EM12	0.06/0.15	0.80/1.25	0.10	0.035	0.035	0.35
EM12K	0.05/0.15	0.80/1.25	0.10/0.35	0.035	0.035	0.35
EM13K	0.07/0.19	0.90/1.40	0.35/0.75	0.035	0.035	0.35
EM15K	0.10/0.20	0.80/1.25	0.10/0.35	0.035	0.035	0.35
High-manganese steel electrodes						
EH14	0.10/0.20	1.70/2.20	0.10	0.035	0.035	0.35

^a Single values are maximums.
^b Electrodes shall be analyzed for those elements for which specific values are shown. Elements other than those shown, which are intentionally added (except iron), shall also be reported. The total of these latter elements and all other elements not intentionally added shall not exceed 0.50%.
^c The copper limit includes any copper coating that may be applied to the electrode.

FIGURE 6-103 Electrode composition. (See Ref. 22 for low-alloy steels.)

Gambar 4. 1 Komposisi Kimia *Elektrode* SAW

Untuk mengetahui besarnya *Heat Input* untuk suatu pengelasan, dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Q = \eta V I \quad (4.1)$$

Keterangan:

Q = *heat input* (W)

η = efisiensi termal (%)

V = tegangan (V)

I = arus (A)

Pada setiap jenis pengelesan memiliki nilai efisiensi termal yang berbeda-beda, berikut adalah tabel nilai efisiensi termal yang telah dicantumkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Nilai Efisiensi *Thermal* setiap Jenias Pengelasan

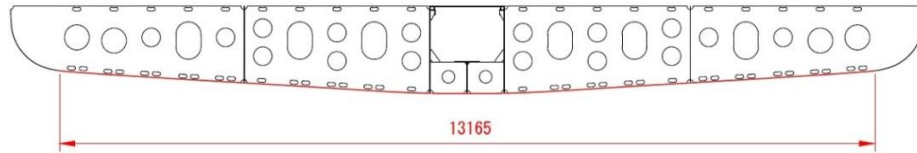
Jenis Pengelasan	η
SAW – Steel	0,91 – 0,99
SMAW – Steel	0,66 – 0,85
FCAW – SS	0,78 – 0,87
GMAW – CO ₂ ; Steel	0,75 – 0,93
GMAW – Ar ; Steel	0,66 – 0,77
GTAW – Ar ; Steel	0,25 – 0,75
GTAW – He ; Al	0,50 – 0,80
GTAW – Ar ; Al	0,22 – 0,46

Sehingga nilai *heat input* yang didapatkan adalah:

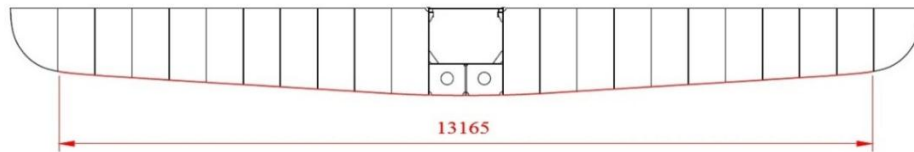
$$\begin{aligned}
 Q &= \eta V I \\
 &= 0,91 \times 28 \times 525 \\
 &= 13377 \text{ W}
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Dikarenakan panjang area pengelasan ketiga *frame* pada konstruksi *bottom* sama, maka perhitungan yang ditampilkan hanya salah satu dari ketiganya yaitu pada frame 74. Pada frame 74 panjang area pengelasan 13165 mm dibagi menjadi 200 *loadsteps*, sehingga ukuran satu elemen yang dibebani *heat flux* adalah 65,825 mm. Dengan kecepatan pengelasan sebesar, v 10.16 mm/s, maka durasi waktu

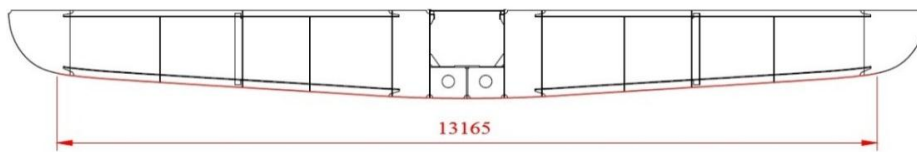
pembebanan pada satu elemen, t adalah 6.48 detik. Gambar 4.2 , 4.3 dan 4.4 merupakan panjang area pengelasan pada Frame 74, 75 dan 76 secara berurutan.



Gambar 4. 2 Panjang Area Pengelasan pada *Frame 74*

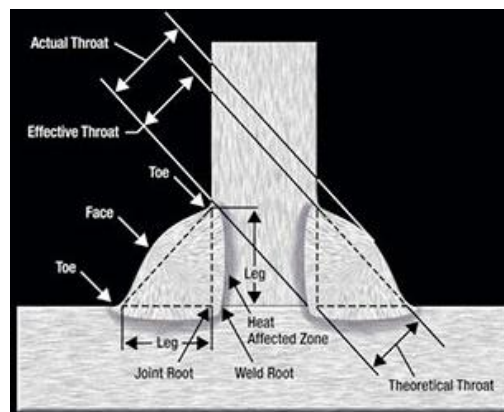


Gambar 4. 3 Panjang Area Pengelasan pada *Frame 75*



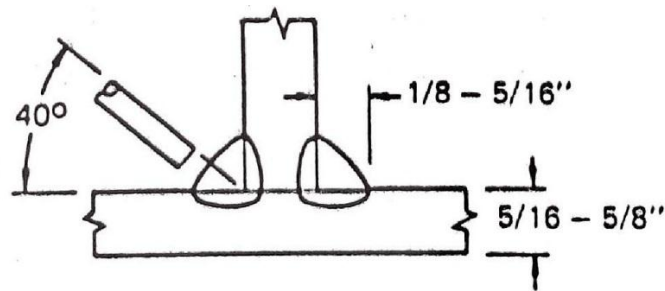
Gambar 4. 4 Panjang Area Pengelasan pada *Frame 76*

Setelah melakukan pembagian area pembebanan, tahap selanjutnya yaitu menentukan besar *throat thickness* dari pengelasan *fillet*. Adapun ilustrasi tentang detail pengelasan *fillet* seperti yang ada pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Ilustrasi *Fillet Weld*

Pada penelitian ini, ketebalan *frame* yang dianalisis yaitu 14 mm (0.5512 inch) dan juga *bottom* memiliki ketebalan 12 (0,4724 inch). Berdasarkan *The Procedure Handbook of Arc Welding* dari The Lincoln Electric Company dan data kontruksi yang didapat, apabila disesuaikan dengan data yang ada maka akan mendapatkan detail pengelasan *fillet* yang akan digunakan dalam penelitian ini seperti yang ada pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Detail Pengelasan *Fillet* yang digunakan (*The Lincoln Electric Company, 1973*)

Berdasarkan Gambar 4.6 plat horizontal diasumsikan sebagai *bottom*, berdasarkan data di gambar rentang ketebalan yang dianjurkan berukuran 5/16 inch (0,3125 inch) sampai 5/8 inch (0,625 inch), maka bottom setebal 12 mm (0,4724) masih masuk dalam rentang tersebut. Perhitungan tahap selanjutnya, parameter pengelasan yang dibutuhkan yaitu panjang kaki las (*leg length (b)*). Dalam penelitian ini, horizontal leg length dan vertical leg length diasumsikan memiliki panjang yang sama. Sehingga, apabila dilihat dari Gambar 4.5 panjang kaki las memiliki rentang 1/8 inch (0,125 mm) hingga 5/16 inch (7,9375 mm), maka panjang kaki pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 5/16 inch (7,9375 mm).

Besarnya luas area pembebanan yang dihasilkan oleh elektroda selama 6.48 detik adalah sebesar,

$$\begin{aligned}
 A_f &= b \cdot v \cdot t \\
 &= 7,9375 \times 10.16 \times 6.48 \\
 &= 486,9404 \text{ mm}^2
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Luasan lain yang berpengaruh adalah luas dari elektroda yang digunakan pada waktu proses pengelasan. Luas elektroda bergantung pada besar kecilnya ukuran diameter elektroda yang digunakan. Luas penampang elektroda yang digunakan adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} Ae &= \frac{1}{4} \pi D^2 \\ &= \frac{1}{4} \pi \times (3,96875)^2 \\ &= 12,3707 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Setelah semua parameter dihitung, maka besarnya *heat flux* adalah sebagai berikut.

- *Heat flux* yang dihasilkan oleh elektroda adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} q_e &= \frac{Q}{Ae} \\ &= \frac{13377}{12,3707} \\ &= 1081,337 \text{ W/mm}^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

- Sehingga *heat flux* yang dibebankan pada satu elemen adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} q_{el} &= q_e \frac{A_l}{A_f} \\ &= 1081,337 \times \frac{65,825}{486,9404} \\ &= 146,17611 \text{ W/mm}^2 \\ &= 146,17 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

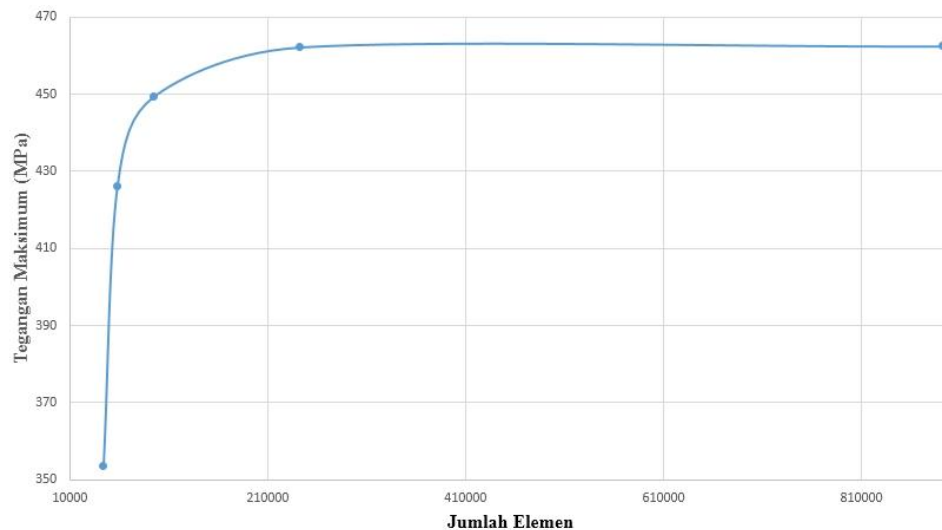
4.2. Meshing Sensitivity

Pada *meshing sensitivity* ini berfungsi untuk mengetahui sensitivitas perubahan yang terjadi pada jumlah elemen dari hasil *meshing*. Pada prinsipnya semakin banyak jumlah elemen pembagi maka semakin kecil nilai kesalahan dari analisis yang dilakukan, akan tetapi efek lainnya adalah berpengaruh terhadap lamanya waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan satu pemodelan. Dalam elemen *shell* penggunaan *meshing* menggunakan geometri luasan sehingga lebih cepat dan juga lebih detil dalam penggunaan *meshing* ini. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Table 4.2.

Tabel 4. 2 Perbandingan Size Meshing, Jumlah Elemen, dan Tegangan Maksimum untuk elemen shell

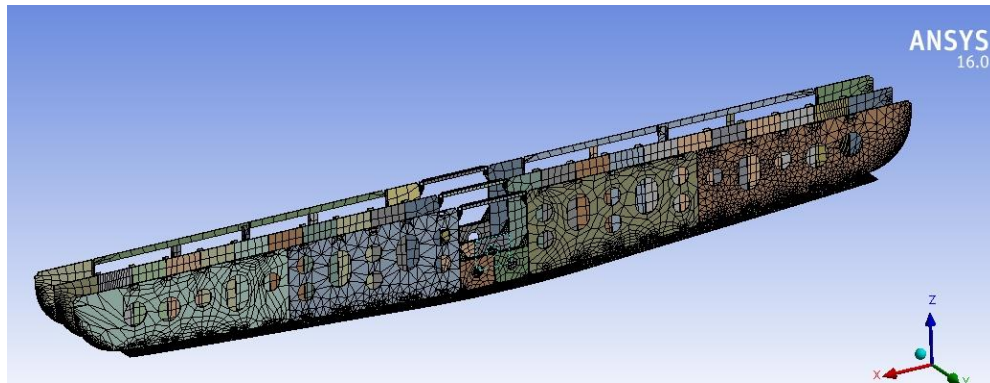
Size meshing (mm)	Jumlah Elemen	Tegangan Maksimum (Mpa)
0,5	43413	353,59
0.4	57538	426,26
0.3	94213	449.38
0.2	241428	462,21
0.1	891523	462,47

Apabila diplotkan ke dalam bentuk grafik maka akan menghasilkan grafik seperti pada Gambar 4.7 seperti berikut ini.



Gambar 4. 7 Grafik Meshing sensitivity elemen shell

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa penambahan jumlah elemen berbanding lurus dengan tegangan maksimum yang dihasilkan. Semakin banyak elemen maka akan semakin besar nilai tegangan maksimum. Penambahan jumlah elemen ini berpengaruh terhadap *solving time* yang semakin lama. Pada Gambar 4.7 juga dapat dilihat bahwa pada jumlah elemen sekitar 240000 elemen, meskipun jumlah elemen bertambah tetapi tidak ada peningkatan besar tegangan maksimum yang signifikan. Maka dari itu ukuran *meshing* yang digunakan untuk pemodelan pada penelitian ini adalah 0,5 mm *quadrilateral* dan 0,2 mm untuk *triangular* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4. 8 Meshing ukuran 0.2 mm *triangular* dan 0.5 mm *quadrilateral*

4.3. Validasi Hasil

Pada penelitian tugas akhi ini, hasil yang diperoleh divalidasi dengan penelitian yang dilakukan Chen (2015) dan Wibowo (2016). Hasil yang divalidasi yaitu berupa temperature history, tegangan sisa, dan distorsi. Adapun perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada obyek serta parameter pengelasan yang digunakan. Pada penelitian ini obyek yang diteliti lebih kompleks apabila dibandingkan dengan obyek penelitian sebelumnya, yaitu berupa konstruksi *bottom* Kapal *Survey Geomarin IV*. Adapun hasil validasi yang diperoleh adalah sebagai berikut:

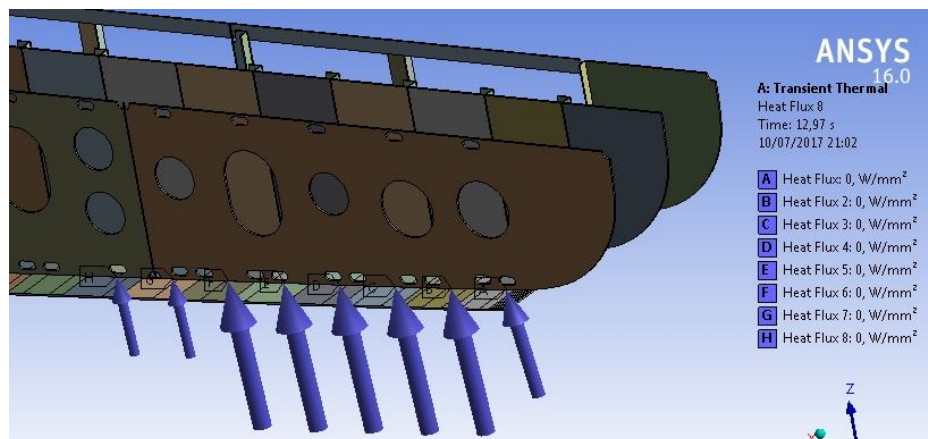
4.3.1. *Temperature History*

Setelah dihitung besarnya *heat flux*, model geometri dianalisis secara *thermal* sehingga menghasilkan distribusi panas dan regangan panas. Pada penelitian ini area pengelasan dibagi menjadi 200 area pembebanan. Konstruksi yang dilas ialah konstruksi *bottom* dengan 3 *frame* yaitu frame 74, 75, dan 76 menggunakan sambungan las tipe *double fillet welded T-Joint*. Konstruksi di las secara bergantian pada setiap frame dengan mempertimbangkan durasi yang telah dihitung. Gambar 4.8 menunjukkan *load step* pembebanan simulasi pengelasan yang dilakukan pada penelitian ini. Dan untuk pembagian loadstep pada penelitian ini telah dicantumkan pada Lampiran.

Sesuai dengan jumlah loadstep yang telah ditentukan, total waktu pengelasan frame 74 yaitu 1295,77 detik atau sekitar 21 menit. Karena panjang konstruksi bottom pada ke 3 frame ini sama, maka loadstep simulasi pengelasan pada frame 75 dan 76 sama seperti pembagian loadstep yang tercantum pada Lampiran. Dan untuk total waktu pengelasan untuk frame 74, 75, dan 76 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.

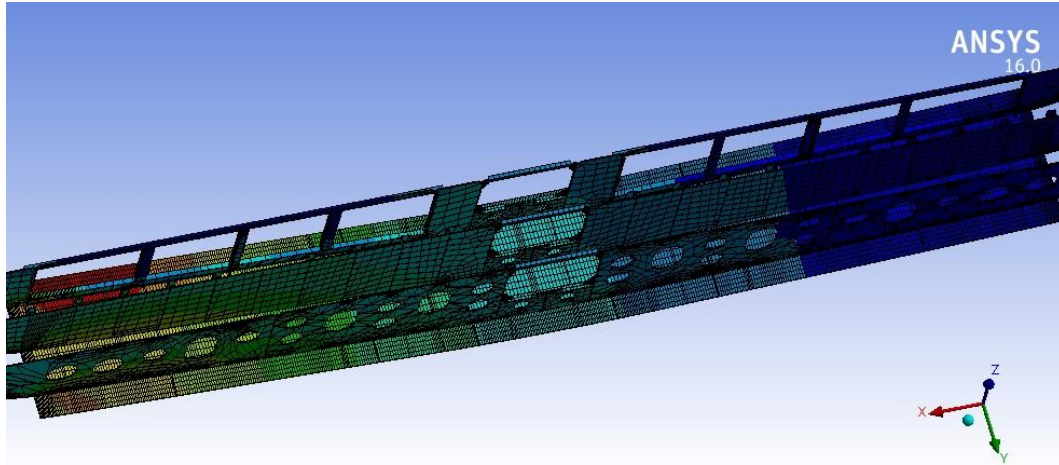
Tabel 4.3. Total Waktu Pengelasan *Frame* 74 hingga 76

<i>Frame</i>	Total Waktu Pengelasan (detik)	Total Waktu Pengelasan (menit)
74	1295,77	21,596
75	1295,77	21,596
76	1295,77	21,596
Total	3887,31	64,788



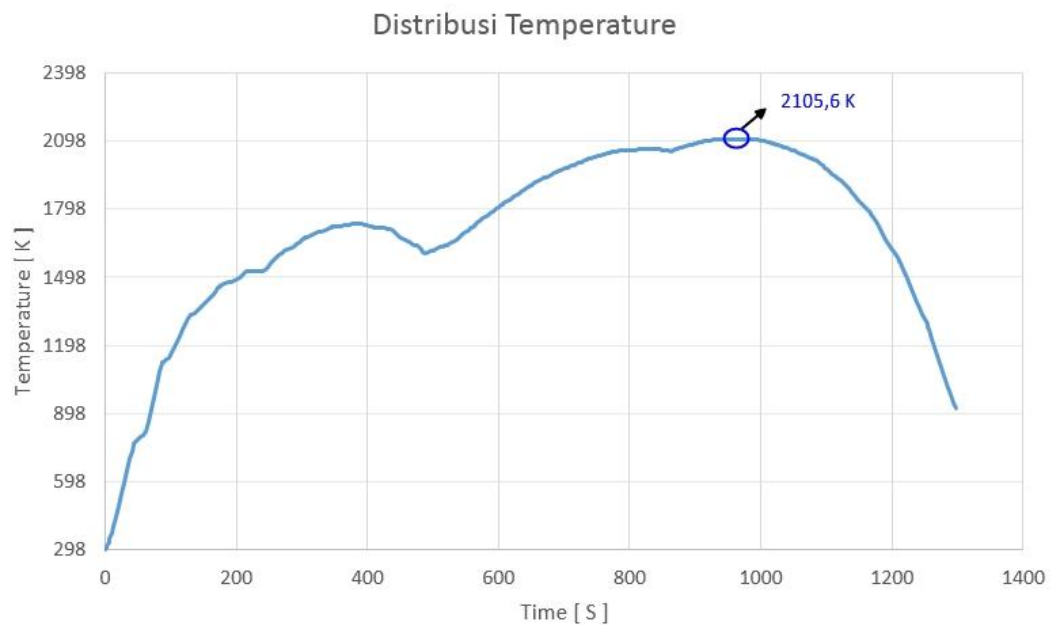
Gambar 4. 9 Area Pembebanan

Gambar 4.10 di bawah ini menunjukkan bagaimana hasil distribusi panas setelah dilakukan simulasi proses pengelasan yang terjadi setelah diberikan beban heat flux pada setiap area pembebanan.



Gambar 4. 10 Simulasi Pada Area Pengelasan

Hasil dari analisis *thermal* adalah distribusi temperatur yang terjadi selama proses pengelasan. Hasil tersebut dapat diplotkan ke dalam bentuk grafik. Gambar 4.11 menunjukkan grafik *temperature history* yang diperoleh dari penelitian ini. Temperatur puncak yang diperoleh dari penelitian ini yaitu sebesar 2105.6 K pada saat detik ke-953,62 atau sekitar menit ke-15.89.



Gambar 4. 11 Grafik *Temperature history*

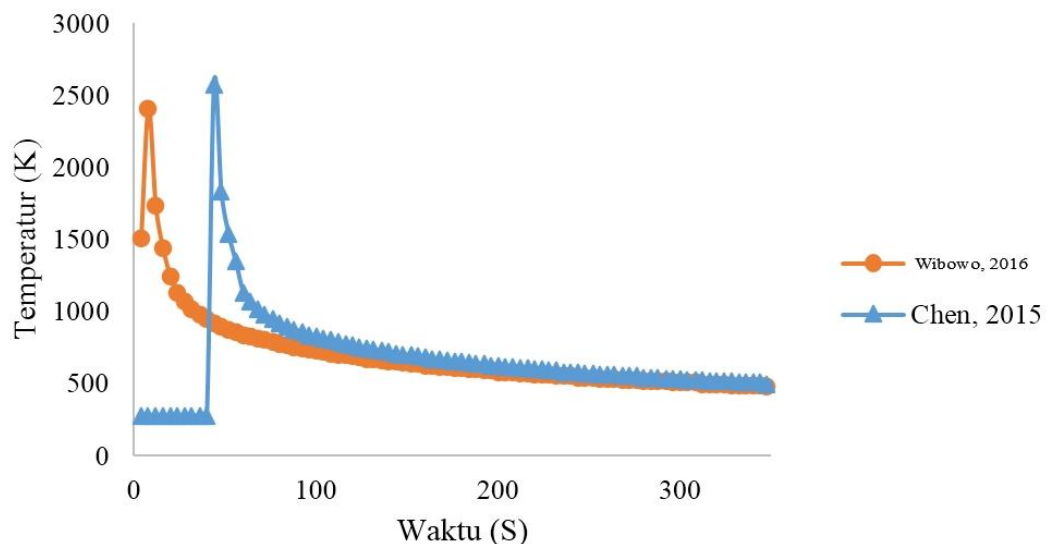
Untuk mengetahui apakah analisa pada penelitian ini sudah sesuai dengan penelitian sebelumnya, maka hasil penelitian ini dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan Chen (2015) dan Wibowo 2016. Adapun validasi yang dilakukan

berupa suhu puncak yang dihasilkan dari analisa thermal. Hasil perbandingan suhu puncak penelitian sebelumnya dan penelitian ini seperti yang ada pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perbandingan Suhu Puncak

Penelitian	Suhu Puncak (K)
Chen (2015)	2573,2
Wibowo (2016)	2402,3
Ramadhan (2017)	2105,6

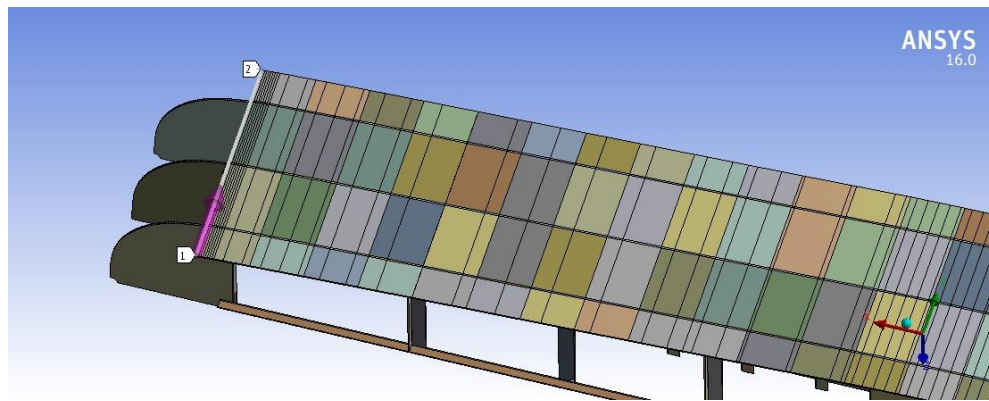
Berdasarkan data perbandingan suhu puncak yang ada pada Tabel 4.4, dapat dikatakan bahwa besar suhu puncak analisis thermal yang didapat pada penelitian ini memiliki titik suhu puncak yang hampir sama dengan penelitian sebelumnya. Dan juga suhu puncak ini telah melewati batas titik lebur dari material yaitu sebesar 1800 K. Adapun perbedaannya terdapat pada detail bentuk grafik serta waktu terjadinya suhu puncak tersebut. Dan pada penelitian sebelumnya Wibowo (2016) membandingkan dengan Chen (2015), grafik distribusi penelitian sebelumnya seperti yang ada pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Grafik Suhu Puncak pada Penelitian sebelumnya (Wibowo, 2016)

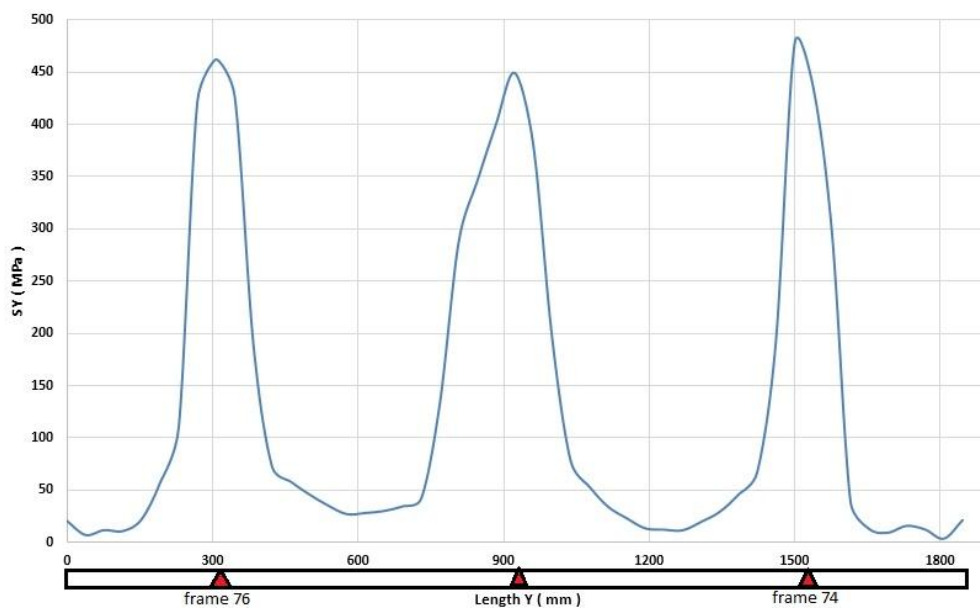
4.3.2 Tegangan Sisa

Jenis tegangan sisa yang dianalisis adalah tegangan sisa *longitudinal*. Tegangan sisa yang ditinjau pada penelitian ini yaitu di daerah antara 2 *transverse stiffener* (L3) seperti pada penelitian Chen (2015) dan Wibowo (2016), namun pada penelitian ini *transverse stiffeners* diasumsikan sebagai *frame* yang dilas pada konstruksi *bottom* kapal. *Pathline* dapat dilihat pada Gambar 4.13 seperti berikut.

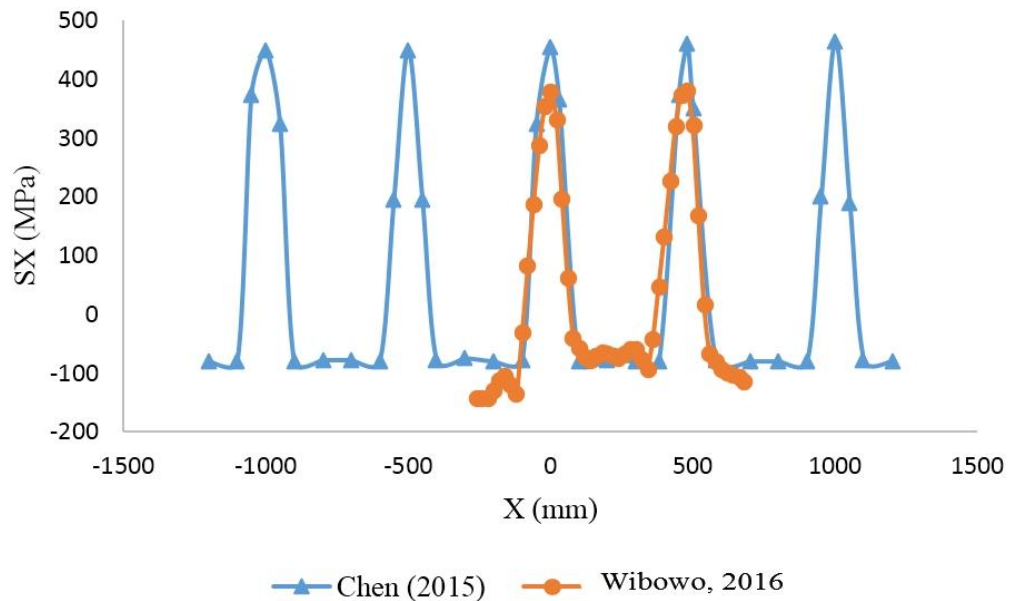


Gambar 4. 13 Pathline Analisis Tegangan Sisa

Dan hasil tegangan sisa yang diperoleh pada *pathline* dapat diplotkan ke dalam grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 berikut.



Gambar 4. 14 Tegangan sisa Bottom Kapal Survey Geomarin IV

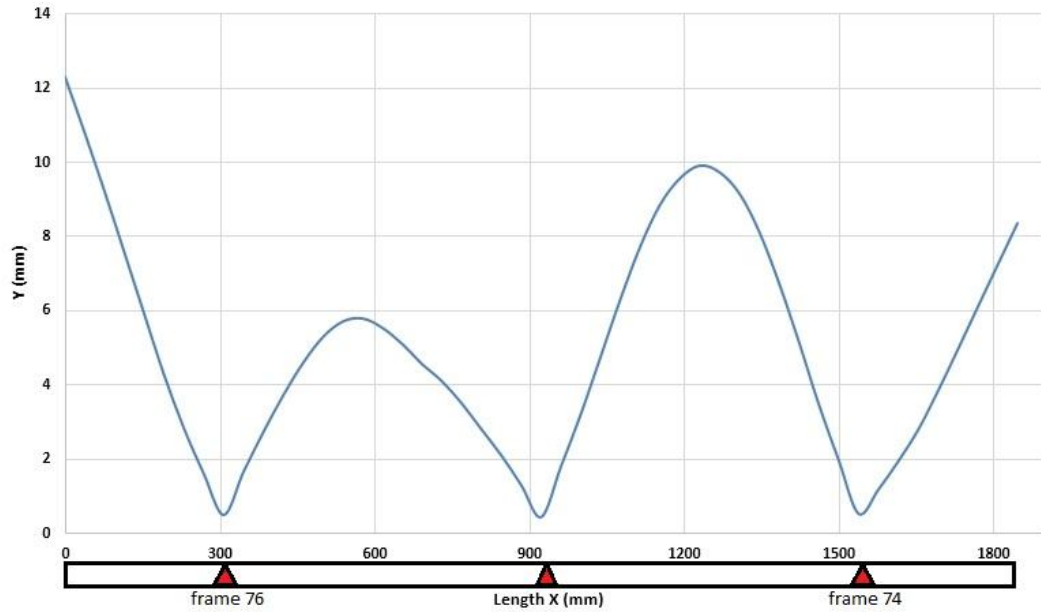


Gambar 4. 15 Tegangan Sisa Penelitian Sebelumnya (Wibowo, 2016)

Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 dapat dilihat dengan jelas bahwa grafik distribusi tegangan sisa *longitudinal* dari penelitian ini memiliki kecenderungan bentuk yang sama dengan grafik distribusi tegangan sisa pada penelitian sebelumnya yaitu penelitian Wibowo (2016) dan Chen (2015). Dari grafik juga terlihat bahwa tegangan sisa tarik maksimum berada pada daerah pengelasan sedangkan tegangan sisa tekan maksimum berada pada daerah yang jauh dari daerah pengelasan. Nilai tegangan sisa yang didapatkan pada penelitian ini lebih besar daripada penelitian Wibowo (2106) dan Chen (2015), hal ini disebabkan karena bentuk geometri yang digunakan berbeda dan lebih kompleks. Nilai tegangan sisa tarik maksimum pada penelitian ini yaitu sebesar 476,64 MPa, sedangkan tegangan sisa tekan maksimum yang diperoleh pada penelitian ini yaitu sebesar 3,58 MPa.

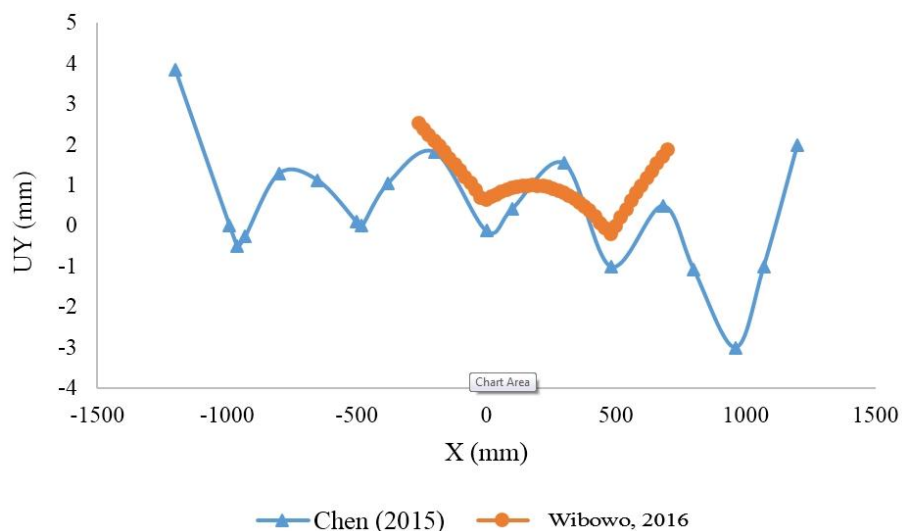
4.3.3 Distorsi

Hasil distorsi pada penelitian ini dilakukan pada sumbu Y dalam satuan millimeter. Pada *Pathline* 1 dilakukan searah sumbu X untuk dapat diketahui besar distorsinya. Distorsi yang terjadi pada *pathline* 1 dapat diplotkan ke dalam grafik.

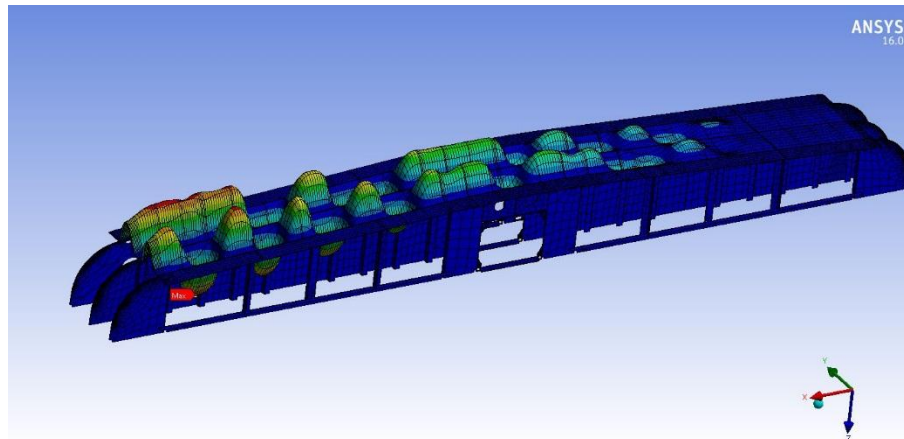


Gambar 4. 16 Grafik Distorsi Bottom Kapal Survey geomarin IV

Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17 terlihat bahwa grafik distribusi distorsi yang terjadi akibat proses pengelasan dari penelitian ini memiliki *trendline* yang sama dengan grafik distribusi distorsi pada penelitian Wibowo (2016) dan Chen (2015). Dan dari grafik juga terlihat bahwa nilai distorsi maksimum terjadi pada daerah dekat dengan *frame 47*. Hal itu disebabkan karena di *frame 47* merupakan frame dengan jenis open floor.



Gambar 4. 17 Grafik Distorsi Penelitian Sebelumnya (Wibowo, 2016)



Gambar 4. 18 Distorsi pada urutan pengelasan konstruksi *bottom* Geomarin IV

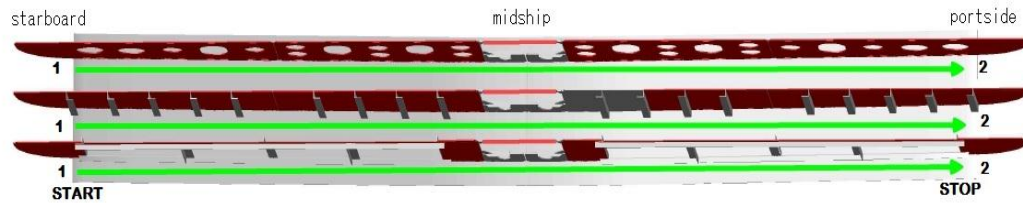
Dari Gambar 4.18 dapat dilihat bahwa pengelasan pada penelitian ini menghasilkan distorsi maksimum sebesar 12,28 mm ($X= 0$ mm) dan distorsi minimum sebesar 8,34 mm ($X= 1846$ mm)

Berdasarkan Gambar grafik-grafik yang telah dijelaskan, seluruh hasil pemodelan thermal dan struktural memiliki kecenderungan bentuk grafik yang sama dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Chen (2015) dan Wibowo (2016) walaupun dengan geometri yang lebih kompleks. Maka dapat disimpulkan bahwa pemodelan pada penelitian ini dinyatakan valid, sehingga dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya yaitu memvariasikan urutan pengelasan.

4.4. Variasi Urutan Pengelasan

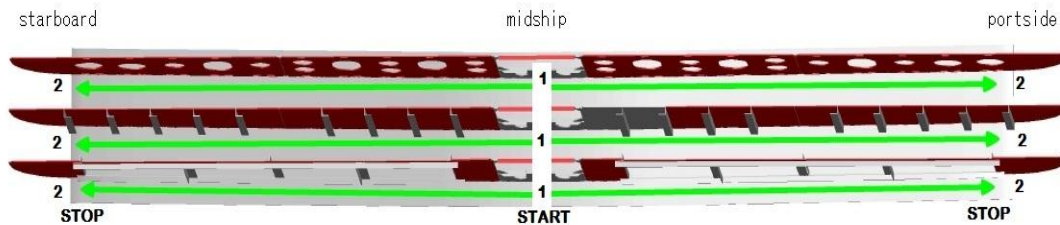
Setelah permodelan pengelasan yang digunakan dinyatakan benar, maka dapat dilakukan variasi pengelasan. Pada penelitian ini akan dilakukan 3 variasi urutan pengelasan yaitu sebagai berikut.

Variasi pertama adalah pengelasan pada ketiga *frame* dari *starboard* menuju *portside* dilakukan dengan arah dan waktu yang bersamaan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.19 dibawah ini. Selain itu, variasi pertama ini juga yang dijadikan sebagai acuan atau pembanding terhadap variasi urutan pengelasan lainnya pada penelitian.



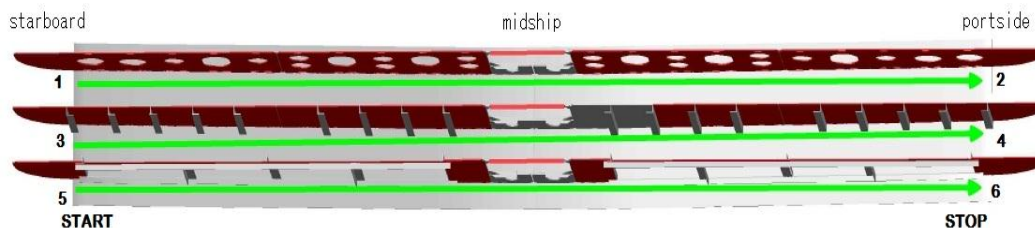
Gambar 4. 19 Variasi Urutan Pengelasan 1

Variasi kedua adalah pengelasan dengan arah simetri atau bersamaan dari midship menuju starboard dan portside dilas secara bersamaan di ketiga frame seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.20 di bawah ini.



Gambar 4. 20 Variasi Urutan Pengelasan 2

Variasi ketiga adalah pengelasan dari starboard menuju portside secara bergantian, berawal dari frame 74 ke frame 75 lalu frame 76. Adapun arahnya seperti yang ada pada Gambar 4.21 di bawah ini.



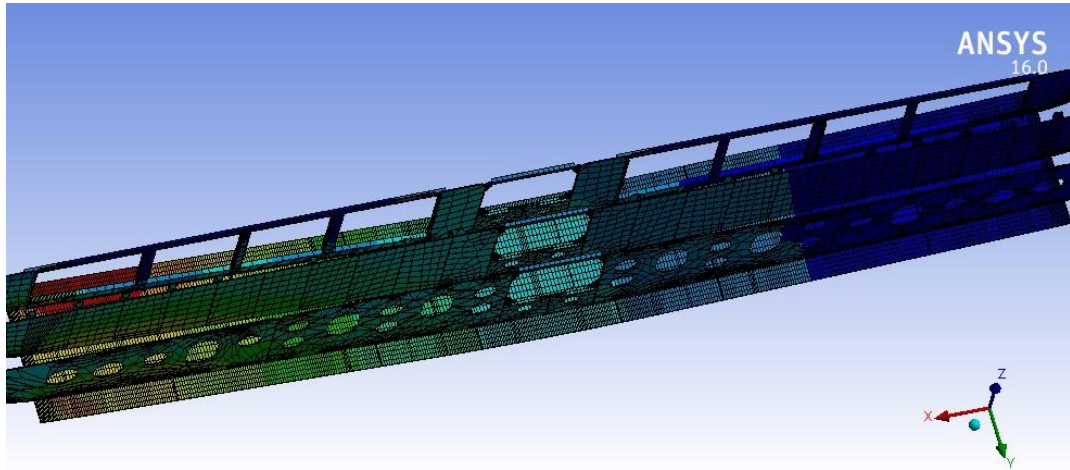
Gambar 4. 21 Variasi Urutan Pengelasan 3

4.5. Hasil Distribusi Panas

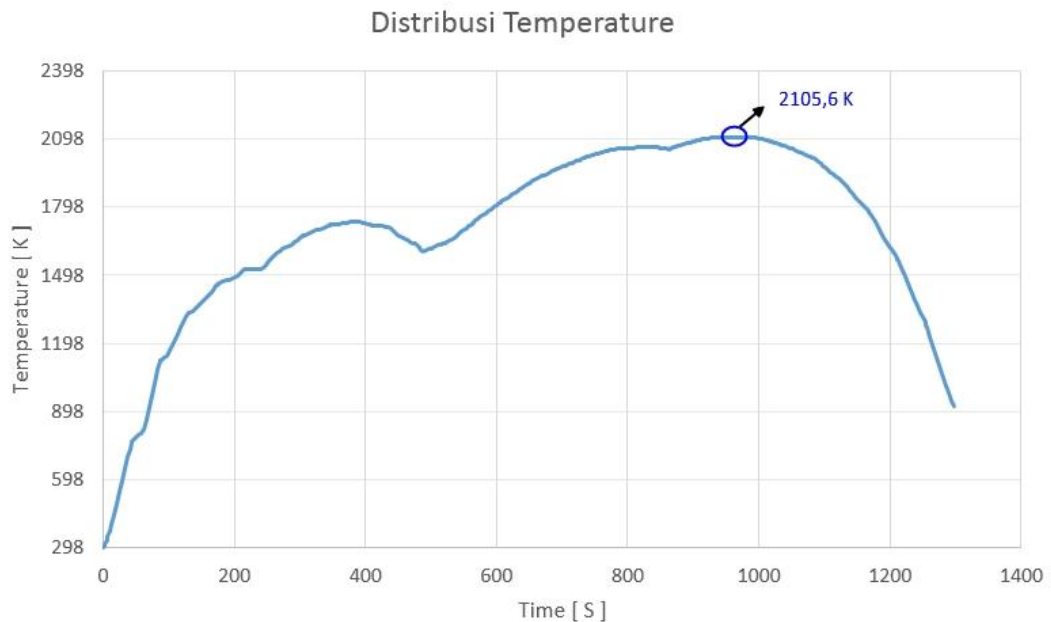
Dalam penjelasan sub-bab sebelumnya, distribusi panas yang dibahas merupakan bagian dari pengelasan pada variasi jenis pertama. Pada sub-bab ini, keseluruhan dari variasi urutan pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini akan ditampilkan berupa ilustrasi distribusi panas beserta grafiknya.

4.5.1. Variasi Pertama

Pada Gambar 4.22 ini merupakan ilustrasi dari kondisi akhir distribusi panas yang terjadi pada variasi pertama. Berdasarkan data yang ada pada grafik distribusi panas, dapat diketahui suhu puncak yang terjadi yaitu sebesar 2105,6 K pada detik 953,62 atau sekitar menit ke-15,92. Untuk Grafik distribusi panas pada variasi pertama ini, seperti yang ada pada gambar 4.23.



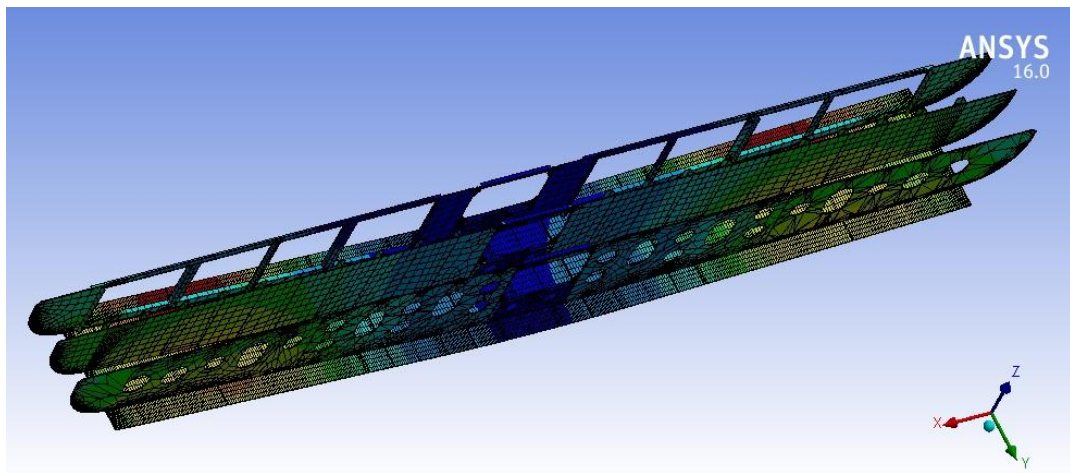
Gambar 4. 22 Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 1



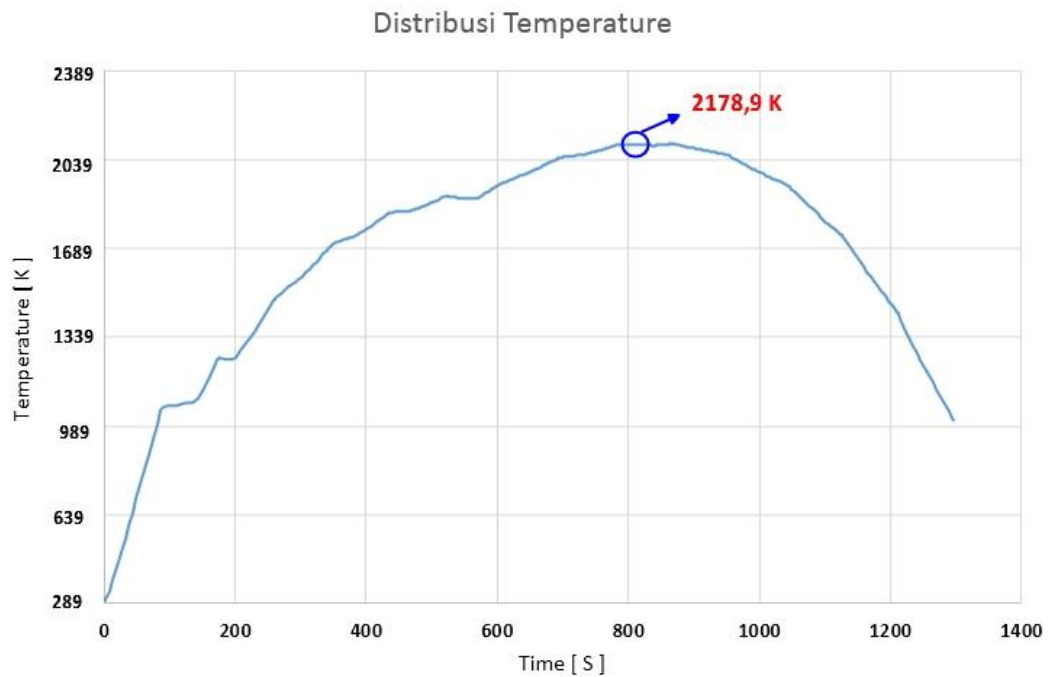
Gambar 4. 23 Grafik Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 1

4.5.2. Variasi Kedua

Pada Gambar 4.24 ini merupakan ilustrasi dari kondisi akhir distribusi panas yang terjadi pada variasi kedua. Berdasarkan data yang ada pada grafik distribusi panas, dapat diketahui suhu puncak yang terjadi yaitu sebesar 2178,9 K pada detik 869,28 atau sekitar menit ke-14,48. Untuk Grafik distribusi panas pada variasi kedua ini, seperti yang ada pada gambar 4.25.



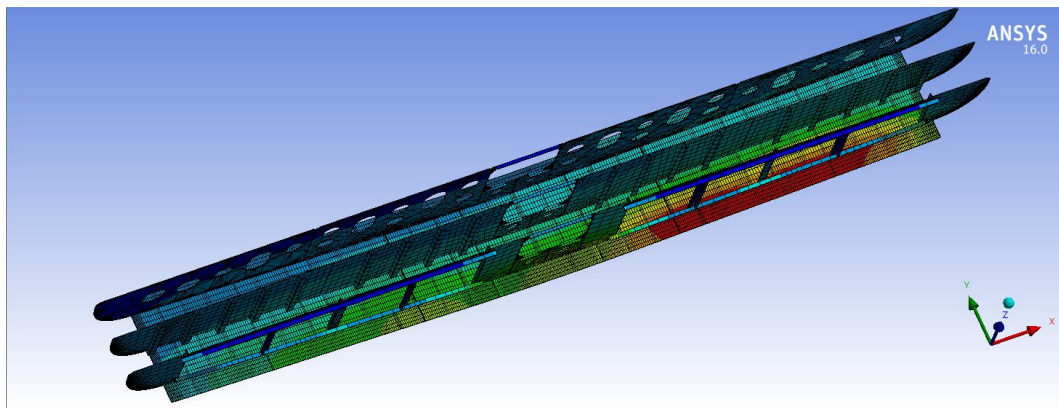
Gambar 4. 24 Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 2



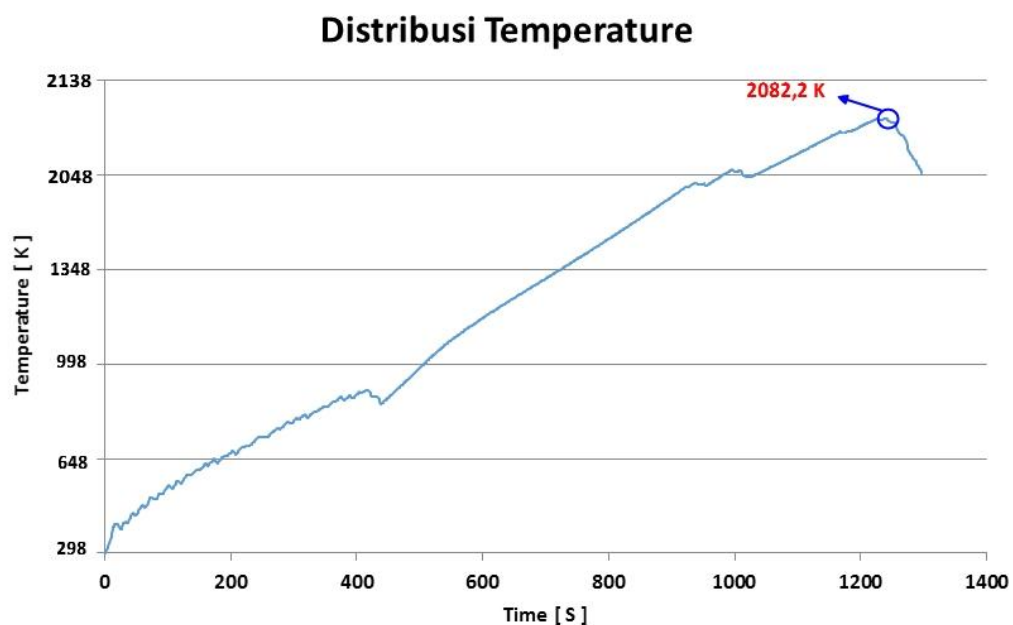
Gambar 4. 25 Grafik Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 2

4.5.3. Variasi Ketiga

Pada Gambar 4.26 ini merupakan ilustrasi dari kondisi akhir distribusi panas yang terjadi pada variasi kedua. Berdasarkan data yang ada pada grafik distribusi panas, dapat diketahui suhu puncak yang terjadi yaitu sebesar 2082,2 K pada detik 1240,1 atau sekitar menit ke-20,6. Untuk Grafik distribusi panas pada variasi kedua ini, seperti yang ada pada gambar 4.27.



Gambar 4. 26 Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 3



Gambar 4. 27 Grafik Distribusi Panas pada Variasi Urutan Pengelasan 3

Adapun rangkuman Suhu Puncak dari hasil keseluruhan variasi urutan pengelasan pada analisa thermal ini bisa dilihat pada Tabel 4.5 di bawah ini.

Tabel 4.5. Suhu Puncak Seluruh Variasi Arah Pengelasan

Variasi Urutan Pengelasan	Suhu Puncak (K)
1	2105,6
2	2178,9
3	2082,2

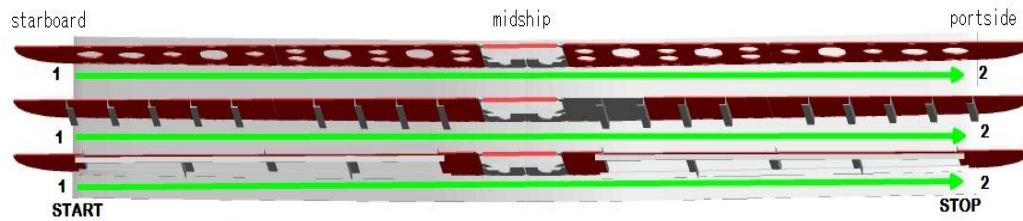
Berdasarkan Tabel 4.5 dapat diketahui bahwa setelah running analisa termal untuk semua variasi, dapat diketahui bahwa variasi kedua memiliki suhu puncak paling tinggi. Dan suhu puncak terendah terdapat pada variasi urutan pengelasan ketiga.

4.6. Hasil Tegangan Sisa

Dalam subbab ini akan ditampilkan hasil dari analisa tegangan sisa yang diurutkan berdasarkan dari variasi alur pengelasan. Dan hasil tegangan sisa yang diperoleh pada masing-masing alur pengelasan kemudian diplotkan ke dalam grafik tegangan sisa. Tinjauan yang dilakukan dalam analisa tegangan sisa ini di daerah antara 2 transverse stiffners seperti yang dilakukan Chen (2015) dan Wibowo (2016). Namun, pada transverse stiffners pada penelitian ini diasumsikan sebagai frames yang dilas pada konstruksi bottom. Adapun hasilnya, sebagai berikut.

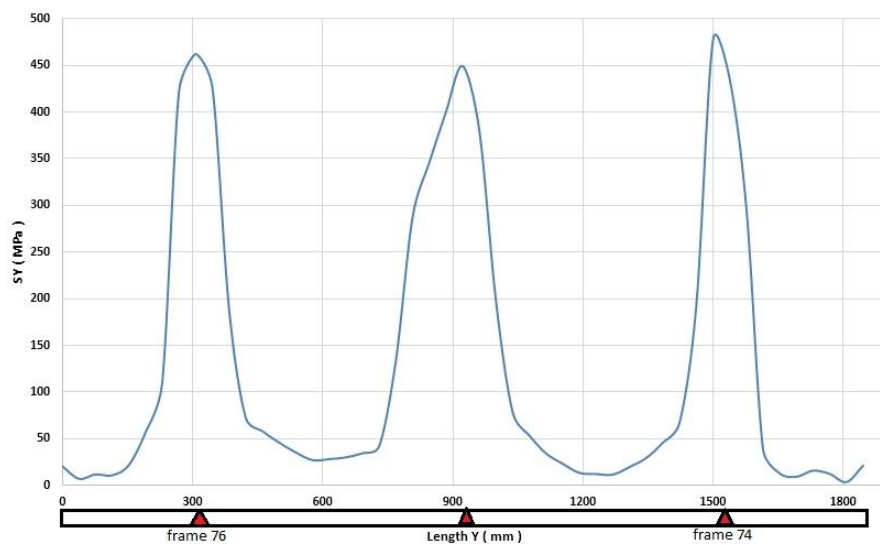
4.6.1. Variasi pertama

Pada Gambar 4.29 ini merupakan grafik tegangan sisa dari variasi urutan pengelasan pertama. Untuk variasi urutan pengelasan pertama ini dimulai dengan arah dan waktu yang sama dari starboard menuju portside di ketiga frame, seperti yang ada pada Gambar 4.28.



Gambar 4. 28 Variasi Urutan Pengelasan 1

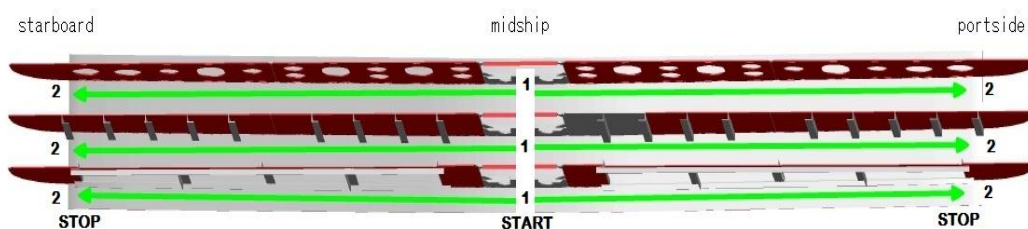
Berdasarkan data yang ada pada Grafik 4.28 tegangan sisa ini, dapat diketahui bahwa variasi urutan pengelasan pertama memiliki hasil tegangan sisa tarik maksimum sebesar 476,64 Mpa dan tegangan sisa tekan maksimum sebesar -3,58 Mpa



Gambar 4. 29 Grafik Tegangan Sisa Variasi Urutan Pengelasan 1

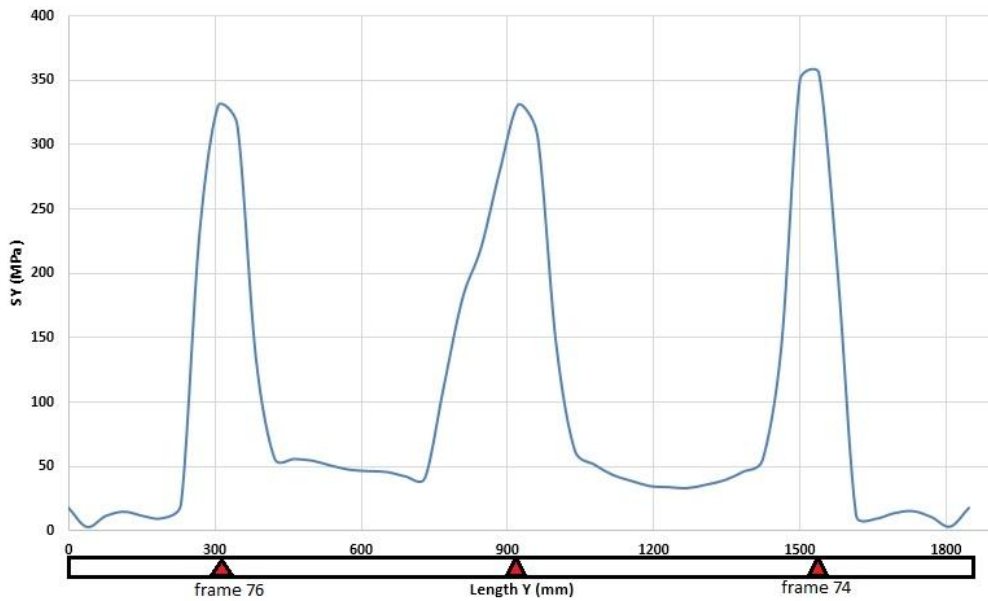
4.6.2. Variasi Kedua

Pada Gambar 4.31 ini merupakan grafik tegangan sisa dari variasi urutan pengelasan kedua. Untuk variasi urutan pengelasan dengan arah simetri atau bersamaan dari midship menuju starboard dan portside dilas secara bersamaan di ketiga frame, seperti yang ada pada Gambar 4.30



Gambar 4. 30 Variasi Urutan Pengelasan 2

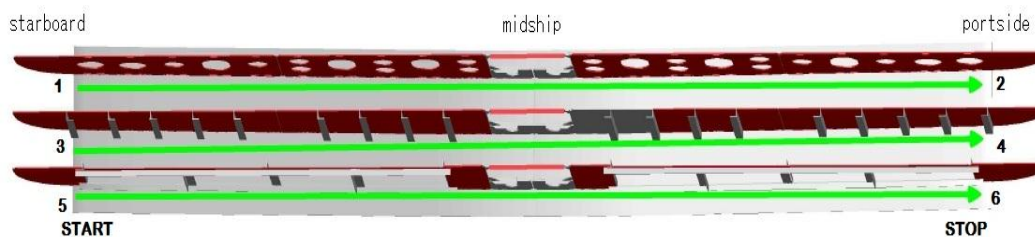
Berdasarkan data yang ada pada Grafik 4.31 tegangan sisa ini, dapat diketahui bahwa variasi urutan pengelasan kedua memiliki hasil tegangan sisa tarik maksimum sebesar 356,32 Mpa dan tegangan sisa tekan maksimum sebesar – 2,62 Mpa.



Gambar 4. 31 Grafik Tegangan Sisa Variasi Urutan Pengelasan 2

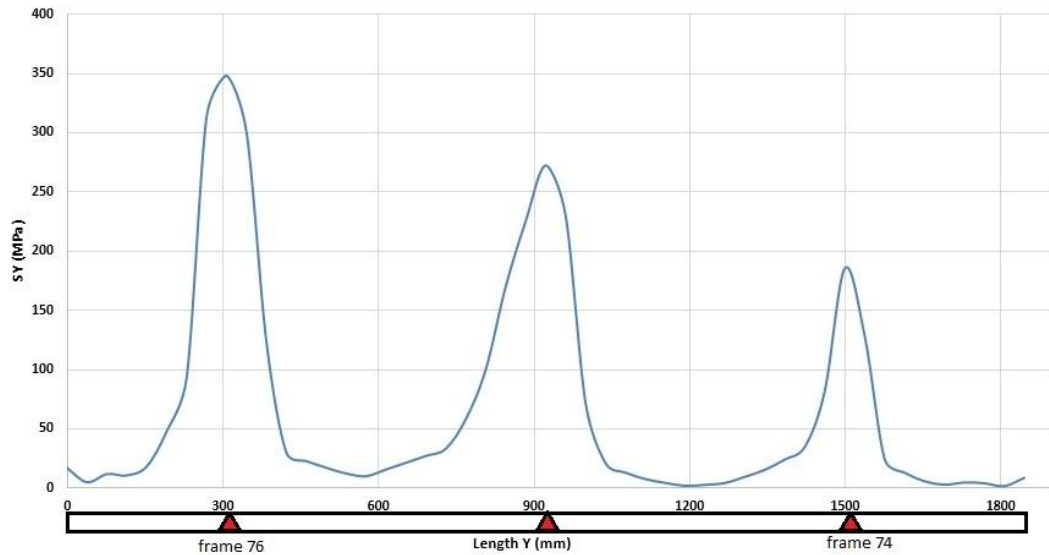
4.6.3. Variasi Ketiga

Pada Gambar 4.33 ini merupakan grafik tegangan sisa dari variasi urutan pengelasan ketiga. Untuk variasi urutan pengelasan ketiga ini dimulai dari starboard menuju portside secara bergantian, pengelasan berawal dari frame 74 ke frame 75 lalu frame 76, seperti yang ada pada Gambar 4.32.



Gambar 4. 32 Variasi Urutan Pengelasan 3

Berdasarkan data yang ada pada Grafik 4.33 tegangan sisa ini, dapat diketahui bahwa variasi urutan pengelasan pertama memiliki hasil tegangan sisa tarik maksimum sebesar 370,28 Mpa dan tegangan sisa tekan maksimum sebesar -1,35 Mpa.

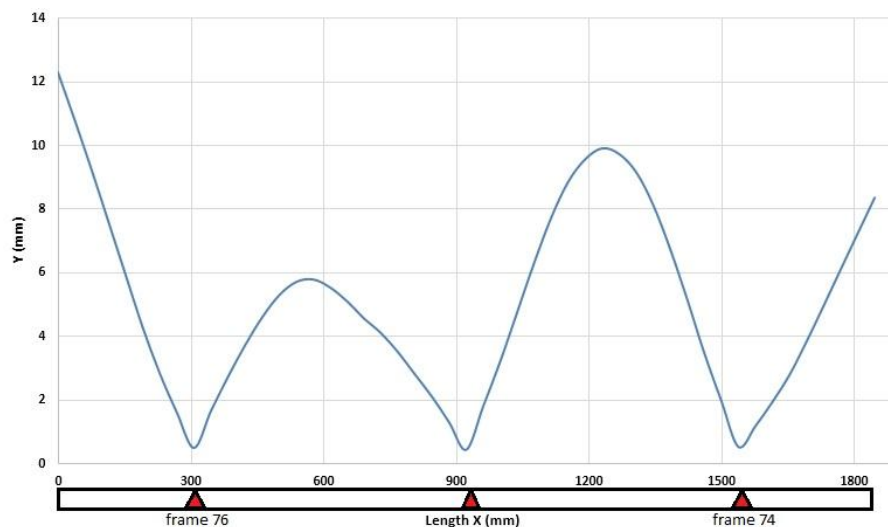


Gambar 4. 33 Variasi Urutan Pengelasan 3

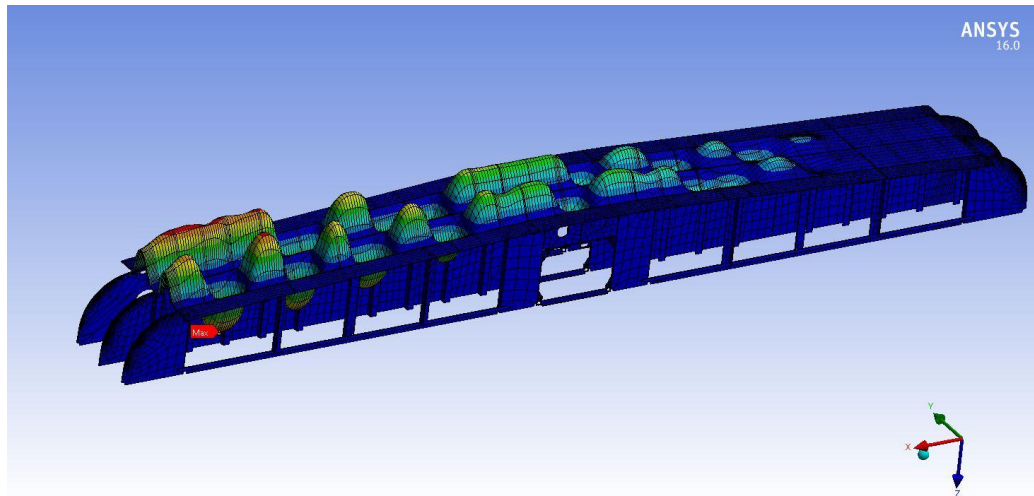
4.7. Hasil Distorsi

4.7.1. Variasi pertama

Grafik hasil distorsi untuk variasi urutan pengelasan pertama dapat dilihat pada Gambar 4.34 dibawah ini.



Gambar 4. 34 Grafik Distorsi pada variasi urutan pengelasan pertama

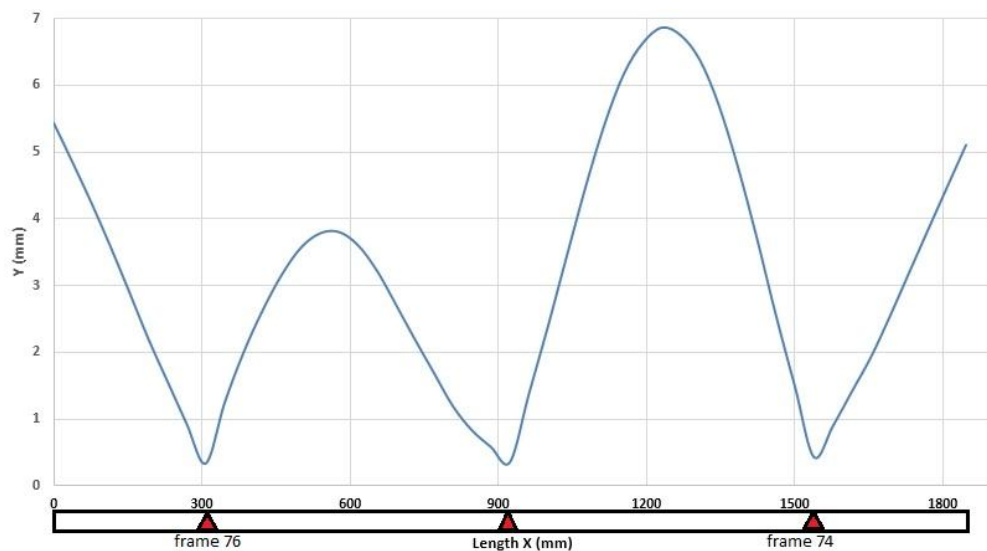


Gambar 4. 35 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan pertama

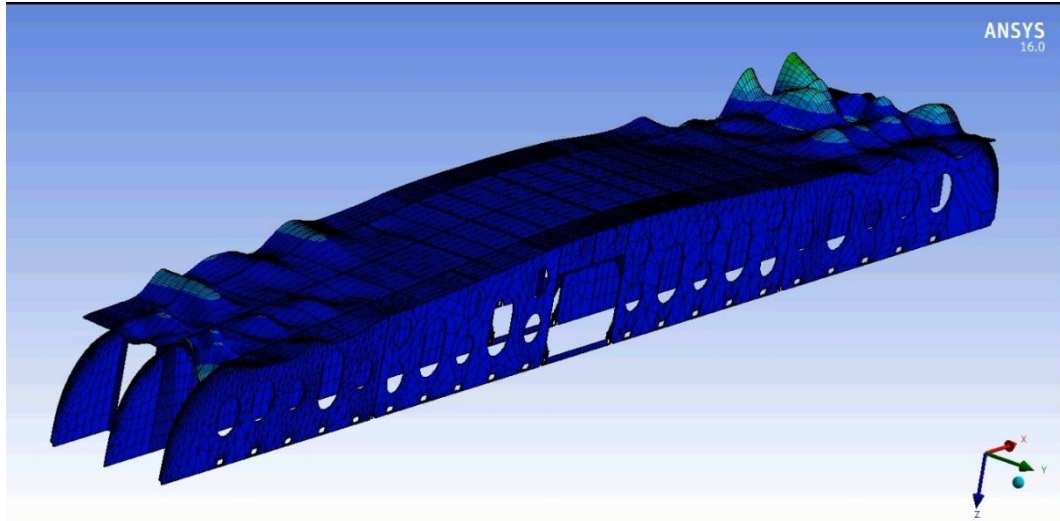
Dan berdasarkan grafik pada Gambar 4.34 dapat dilihat bahwa pada variasi urutan pengelasan pertama ini, menghasilkan distorsi sebesar 12,28 mm ($X = 0$ mm) dan distorsi sebesar 8,34 mm ($X = 1846$ mm) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.35.

4.7.2. Variasi Kedua

Grafik hasil distorsi untuk variasi urutan pengelasan kedua dapat dilihat pada Gambar 4.36 dibawah ini.



Gambar 4. 36 Grafik Distorsi pada variasi urutan pengelasan kedua

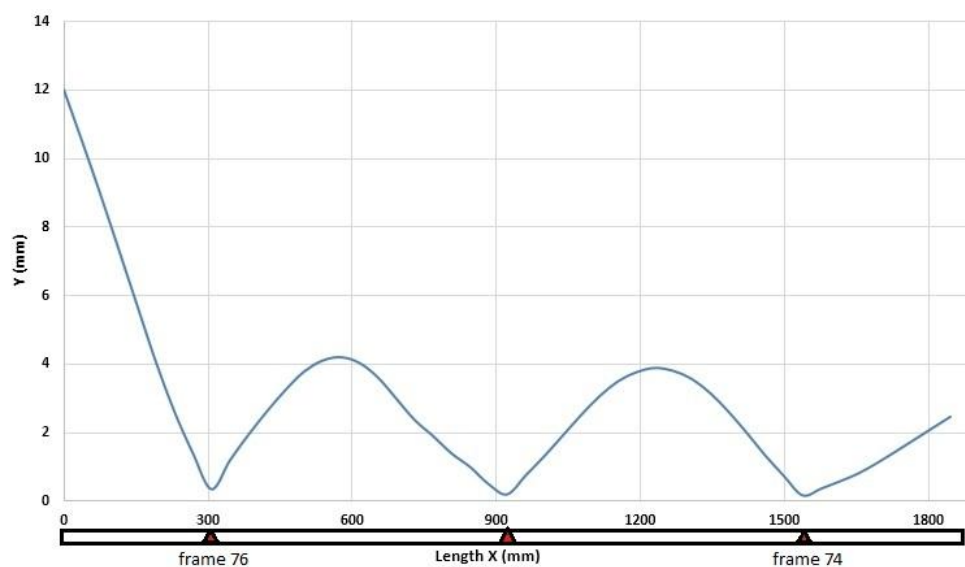


Gambar 4. 37 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan kedua

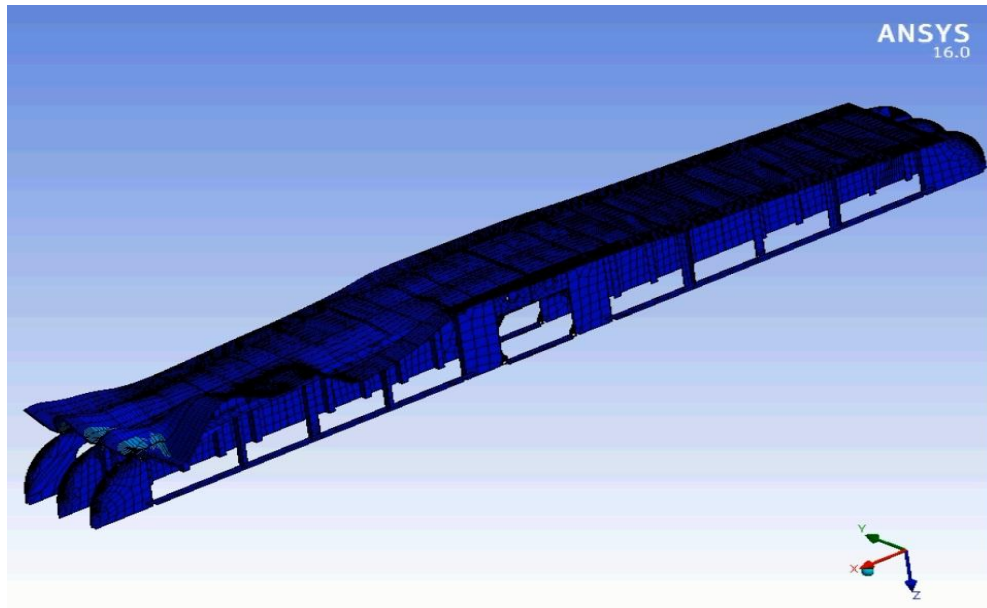
Dan berdasarkan grafik pada Gambar 4.36 dapat dilihat bahwa pada variasi urutan pengelasan kedua ini, menghasilkan distorsi sebesar 5,43 mm ($X= 0$ mm) dan distorsi sebesar 5,10 mm ($X= 1846$ mm) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.37.

4.7.3. Variasi Ketiga

Grafik hasil distorsi untuk variasi urutan pengelasan ketiga dapat dilihat pada Gambar 4.38 dibawah ini.



Gambar 4. 38 Grafik Distorsi pada variasi urutan pengelasan ketiga



Gambar 4. 39 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan ketiga

Dan berdasarkan grafik pada Gambar 4.38 dapat dilihat bahwa pada variasi urutan pengelasan kedua ini, menghasilkan distorsi maksimum sebesar 12,01 mm ($X = 0$ mm) dan distorsi minimum sebesar 2,46 mm ($X = 1846$ mm) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.39

4.8. Pengaruh Variasi Urutan Pengelasan terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi

Dari hasil tegangan sisa dan distorsi yang sudah dijelaskan pada subbab sebelumnya, dapat dirangkum seperti yang ada pada Tabel 4.6 dan tabel 4.7 di bawah ini.

Tabel 4.6 Hasil Tegangan Sisa dari semua variasi urutan pengelasan

Variasi	Tegangan Tarik Maksimum (MPa)	Tegangan Tekan Maksimum (MPa)
1	476,64	3,58
2	356,32	2,62
3	370,28	1,35

Sesuai dengan Tabel 4.6 diatas variasi urutan pengelasan kedua merupakan variasi urutan pengelasan yang menghasilkan tegangan sisa tarik dan tegangan sisa tekan paling minimum dibandingkan dengan variasi lainnya. Hal tersebut dikarenakan pada variasi urutan pengelasan kedua bergerak mulai dari midship

secara berbarengan menuju portside dan starboard. Dan pada variasi urutan pengelasan kedua suhu puncak berada pada frame 74, dimana pada frame tersebut merupakan jenis solid floor.

Tabel 4.7 Hasil Distorsi dari semua variasi urutan pengelasan

Variasi	UZ			
	Ujung Inner Bottom dekat Frame 76	Lokasi (X = 0 mm)	Ujung Inner Bottom dekat Frame 74	Lokasi (X = 1846mm)
1	12,28	Portside Frame 76	8,34	Portside Frame 74
2	5,43	Starboard Frame76	5,10	Starboard Frame76
3	12,01	Portside Frame 76	2,46	Portside Frame 74

Dan untuk hasil Distorsi, seperti yang ada pada Tabel 4.7 di atas. Dari Tabel 4.7 dapat diketahui bahwa variasi urutan pengelasan kedua memiliki nilai distorsi paling minimum dan perbedaan besar distorsi antara lokasi X= 0 mm dengan X= 1846 mm tidak terlalu jauh. Hal itu dikarenakan pada variasi urutan pengelasan kedua ini pergerakan las mulai dari midship ke starboard dan portside secara bersamaan sehingga memiliki panas di kedua ujungnya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis-analisis pada penelitian ini, maka dapat diambil kesimpulan, yaitu:

1. Grafik distribusi tegangan sisa *longitudinal* dan distorsi dari penelitian ini memiliki kecenderungan bentuk yang sama dengan grafik distribusi tegangan sisa dan distorsi pada penelitian Chen (2015) dan Wibowo (2016). Besarnya tegangan sisa dan distorsi yang diperoleh pada penelitian ini adalah sebagai berikut.
 - a. Besarnya nilai tegangan sisa tarik maksimum (σ_x) yaitu sebesar 476,64 MPa, sedangkan tegangan sisa tekan maksimum (σ_x) yaitu sebesar 3,58 MPa.
 - b. Besarnya nilai distorsi yang dihasilkan yaitu sebesar 12,28 mm (X=0 mm) dan 8,34 mm (X= 1846 mm)
2. Variasi urutan pengelasan memberikan efek yang berbeda terhadap tegangan sisa dan distorsi. Adapun efeknya tersebut adalah sebagai berikut.
 - a. Variasi urutan pengelasan sedikit berpengaruh terhadap hasil tegangan sisa *longitudinal*. Variasi 2 menghasilkan nilai tegangan sisa maksimum paling kecil yaitu nilai tegangan sisa tarik maksimum (σ_x) sebesar 356,32 MPa dan tegangan sisa tekan maksimum (σ_x) sebesar 2,62 MPa.
 - b. Variasi urutan pengelasan mempunyai pengaruh terhadap hasil dari distorsi. Arah pengelasan yang menuju *frame* mempunyai nilai distorsi yang lebih kecil dibandingkan arah pengelasan yang menuju ke ujung bebas (*free edge*). Variasi 2 menghasilkan nilai distorsi yang paling minimum diantara 3 variasi lainnya yaitu sebesar 5,43 mm (X= 0 mm) dan 5,10 mm (X= 1846 mm).

5.2 Saran

Hasil dari penelitian ini diharapkan bisa menjadi salah satu acuan untuk studi pengelasan. Penulis menyadari masih banyaknya kekurangan dalam

penelitian ini dan agar mendapatkan hasil yang lebih baik di masa mendatang, maka penulis memberikan beberapa saran untuk dikembangkan pada penelitian selanjutnya, yaitu.

1. Menambah Variasi Urutan Pengelasan yang sesuai dengan dunia kerja di lapangan fabrikasi.
2. Menggunakan bagian konstruksi kapal yang lebih lengkap lagi
3. Menggunakan kondisi pengelasan yang lain.

Daftar Pustaka

- ANSYS, Inc. 2013. *ANSYS Mechanical User's Guide: Release 15.0*. Canonsburg: ANSYS, Inc.
- Arifin, A. 2016. "Post Weld Heat Treatment (PWHT) pada Proses Pengelasan", (Online), (<http://achmadarifin.com/welding/post-weld-heat-treatment-pwht-pada-proses-pengelasan>, diakses 23 Juni 2017).
- Chen, Zhen. Et al. 2015. *Influence of Welding Sequence on Welding Deformation and Residual Stress of a Stiffened Plate Structure*. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University.
- Cary, H.B., (1994), *Modern Welding Technology 3rd Ed.*, Englewood Cliffs, New Jersey, Regents/Pretince Hall.
- Eyres, D. J. 2001. *Ship Construction Fifth edition* . Plymouth: University of Plymouth.
- Gannon, L. 2011. *Effect of Welding Residual Stress and Distortion on Ship Hull Structural Performance*. Thesis Doctor of Philosophy. Halifax: Department of Civil and Resource Engineering, Dalhousie University.
- Paik, J. K. 2010. "Nonlinear Finite Element Analysis", Ship Structural Analysis and Design. Chapter. 8: 8.1 – 8.21.
- Setyawati, Sri Yuni. 2010. *Analisa Pengaruh Tegangan Sisa dan Distorsi pada Pengelasan Butt Joint dan T-Joint Dengan Variasi Tebal Plat*. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sunaryo, Heri. 2008. *Teknik Pengelasan Kapal untuk SMK*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional.
- Syahroni, N. dan M. I. Purbawanto Hidayat. 2012. *3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stress and Distortions*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Syahroni, N. 2001. *Teknologi Las, Modul 2 : Jenis-Jenis Proses Las*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tritton, col. 2008. "Monitoring Small Vessel Seaworthiness", (Online), (<http://www.splashmaritime.com.au/Marops/data/less/Shipk/Shiptext/Seaworthcox.htm>, diakses 23 july 2017).

- Muhammad, Satrio. 2016. *Analisis Numerik Tegangan Sisa dan Distorsi Aluminium 5083 dengan Variasi Arus Listrik sebagai Welding Heat Input*. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wibisono, B.O.B. 2017. *Analisa Tegangan Sisa pada Panel Plat dengan Metode Elemen Hingga Menggunakan Jenis Elemen Solid dan Elemen Shell*. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Wibowo, Bima Arif. 2016. *Analisa Numerik Tegangan Sisa dan Distorsi Pada Struktur Plat Berpenegar Jamak Dengan Variasi Urutan Pengelasan*. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wicaksono, Alif Priyo. 2005. *Simulasi Distribusi Panas, Tegangan Sisa dan Distorsi dengan Metode Elemen Hingga*. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wiryosumarto, H., dan T. Okumura. 2000. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: Pradnya Paramita

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

PEMBAGIAN LOAD STEPS

(halaman ini sengaja dikosongkan)

Pembagian loadstep atau area pembebanan pada Frame 74

Nomer Load Step	Durasi Pengelasan	40	259,15
1	6,48	41	265,63
2	12,96	42	272,11
3	19,44	43	278,59
4	25,92	44	285,07
5	32,39	45	291,55
6	38,87	46	298,03
7	45,35	47	304,51
8	51,83	48	310,98
9	58,31	49	317,46
10	64,79	50	323,94
11	71,27	51	330,42
12	77,75	52	336,90
13	84,22	53	343,38
14	90,70	54	349,86
15	97,18	55	356,34
16	103,66	56	362,81
17	110,14	57	369,29
18	116,62	58	375,77
19	123,10	59	382,25
20	129,58	60	388,73
21	136,06	61	395,21
22	142,53	62	401,69
23	149,01	63	408,17
24	155,49	64	414,65
25	161,97	65	421,12
26	168,45	66	427,60
27	174,93	67	434,08
28	181,41	68	440,56
29	187,89	69	447,04
30	194,37	70	453,52
31	200,84	71	460,00
32	207,32	72	466,48
33	213,80	73	472,96
34	220,28	74	479,43
35	226,76	75	485,91
36	233,24	76	492,39
37	239,72	77	498,87
38	246,20	78	505,35
39	252,67	79	511,83
		80	518,31
		81	524,79

82	531,26
83	537,74
84	544,22
85	550,70
86	557,18
87	563,66
88	570,14
89	576,62
90	583,10
91	589,57
92	596,05
93	602,53
94	609,01
95	615,49
96	621,97
97	628,45
98	634,93
99	641,41
100	647,88
101	654,36
102	660,84
103	667,32
104	673,80
105	680,28
106	686,76
107	693,24
108	699,71
109	706,19
110	712,67
111	719,15
112	725,63
113	732,11
114	738,59
115	745,07
116	751,55
117	758,02
118	764,50
119	770,98
120	777,46
121	783,94
122	790,42
123	796,90
124	803,38

125	809,85
126	816,33
127	822,81
128	829,29
129	835,77
130	842,25
131	848,73
132	855,21
133	861,69
134	868,16
135	874,64
136	881,12
137	887,60
138	894,08
139	900,56
140	907,04
141	913,52
142	920,00
143	926,47
144	932,95
145	939,43
146	945,91
147	952,39
148	958,87
149	965,35
150	971,83
151	978,30
152	984,78
153	991,26
154	997,74
155	1004,22
156	1010,70
157	1017,18
158	1023,66
159	1030,14
160	1036,61
161	1043,09
162	1049,57
163	1056,05
164	1062,53
165	1069,01
166	1075,49
167	1081,97

168	1088,44
169	1094,92
170	1101,40
171	1107,88
172	1114,36
173	1120,84
174	1127,32
175	1133,80
176	1140,28
177	1146,75
178	1153,23
179	1159,71
180	1166,19
181	1172,67
182	1179,15
183	1185,63
184	1192,11
185	1198,59
186	1205,06
187	1211,54
188	1218,02
189	1224,50
190	1230,98
191	1237,46
192	1243,94
193	1250,42
194	1256,89
195	1263,37
196	1269,85
197	1276,33
198	1282,81
199	1289,29
200	1295,77

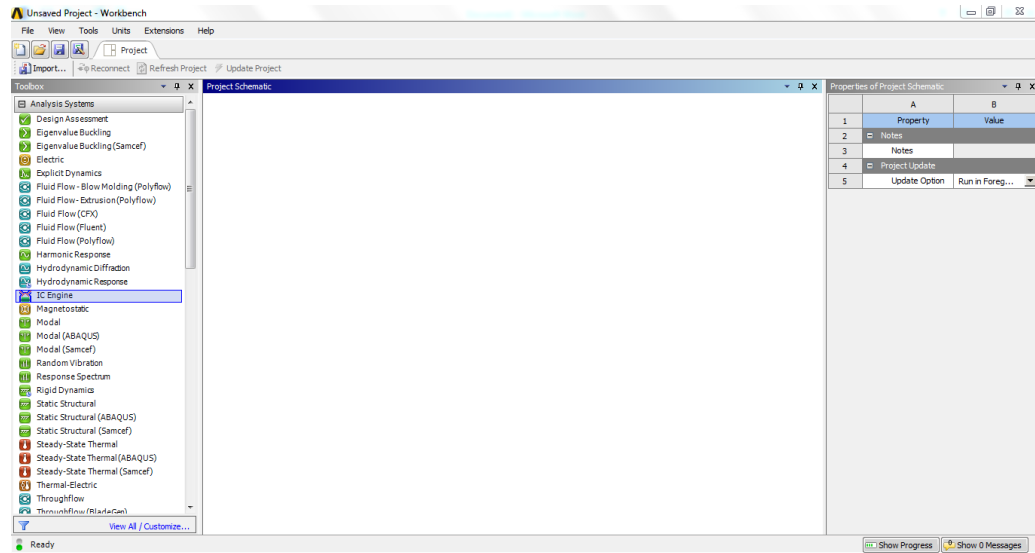
(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN B

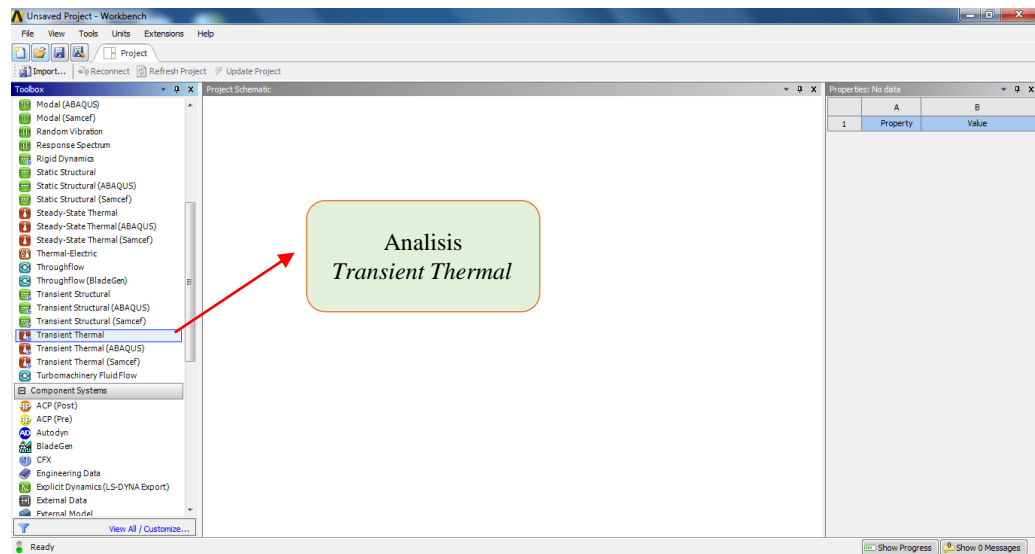
PERMODELAN THERMAL

(halaman ini sengaja dikosongkan)

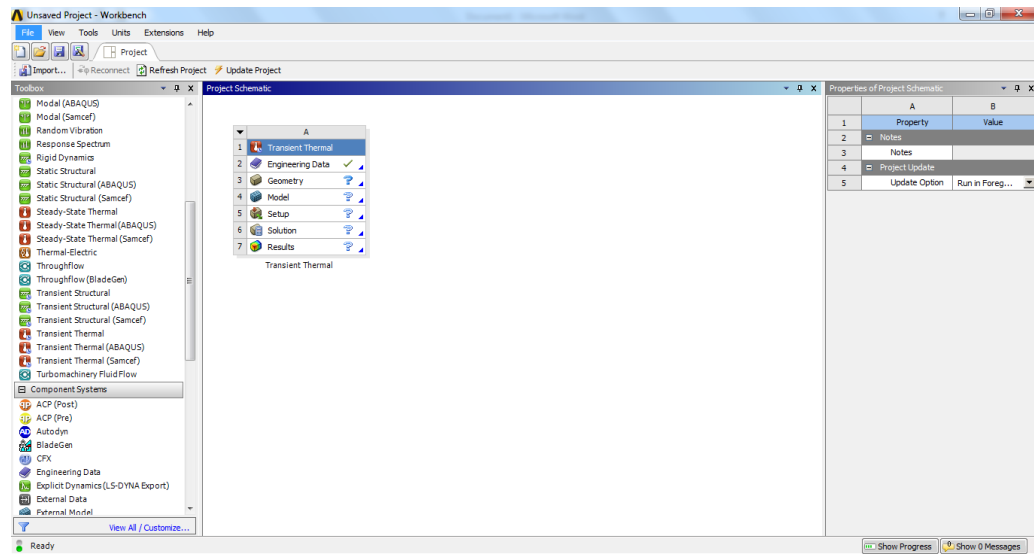
1. Tampilan Awal ANSYS Workbench 16.0.



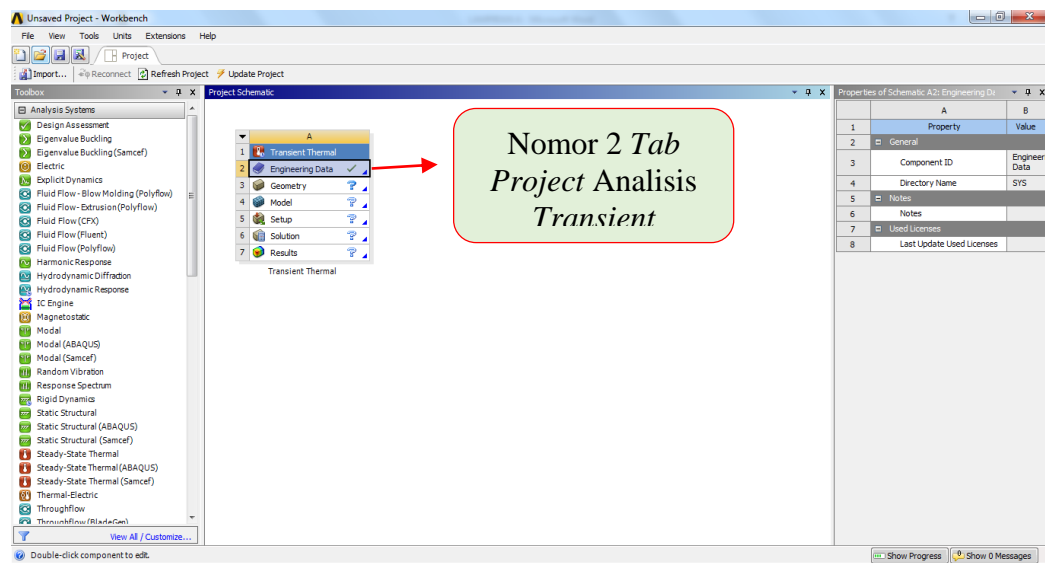
2. Memilih Jenis Analisis “*Transient Thermal*”.



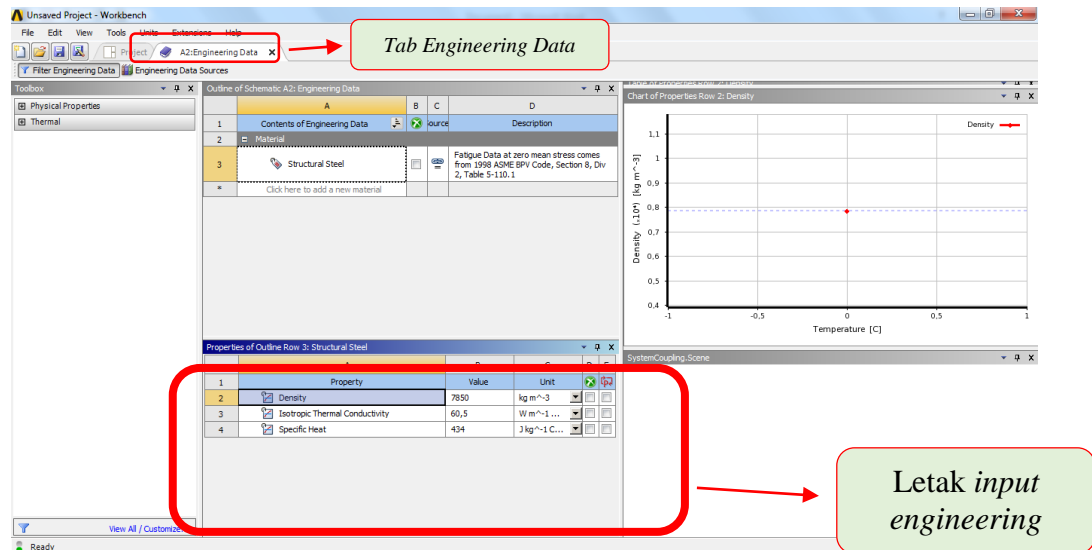
Kemudian membawa analisis *transient thermal* ke *Project Schematic*.



3. Memasukkan *Engineering Data* pada Nomor 2 *Tab Project Analysis Transient Thermal*.

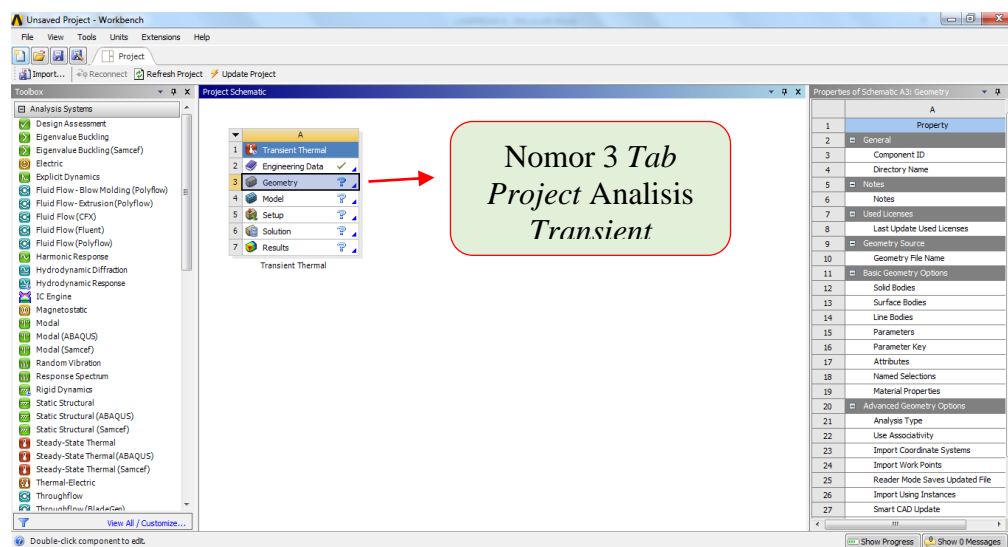


Data yang dimasukkan yaitu berupa data-data dasar sifat konstruksi yang akan dianalisis.

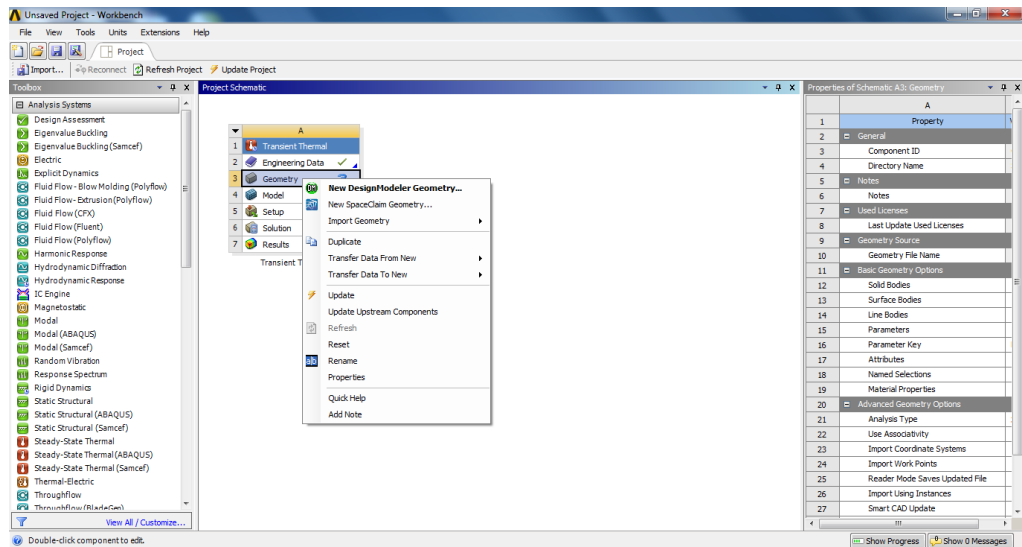


Data tersebut meliputi massa jenis (*density*), konduktivitas thermal isotropik (*isotropic thermal conductivity*), dan *specific heat*. Satuan data yang akan dimasukkan dapat disesuaikan dengan pilihan yang telah tersedia di ANSYS. Setelah memasukkan data, tutup *tab engineering data*.

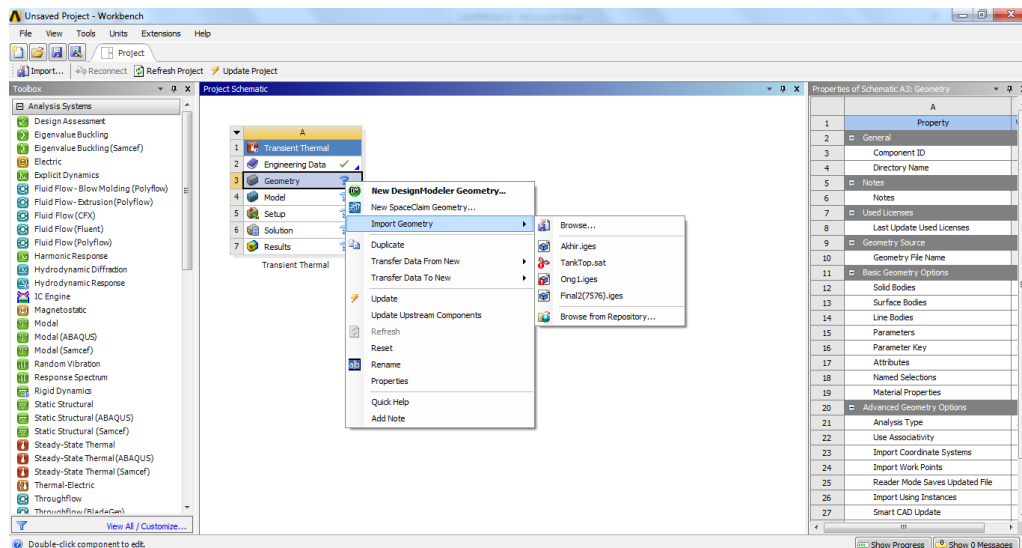
4. Memasukkan Data Geometri pada Nomor 3 *Tab Project Analisis Transient Thermal*.



Langkah awal yang dilakukan yaitu mengklik kanan nomor 3 (*Geometry*),

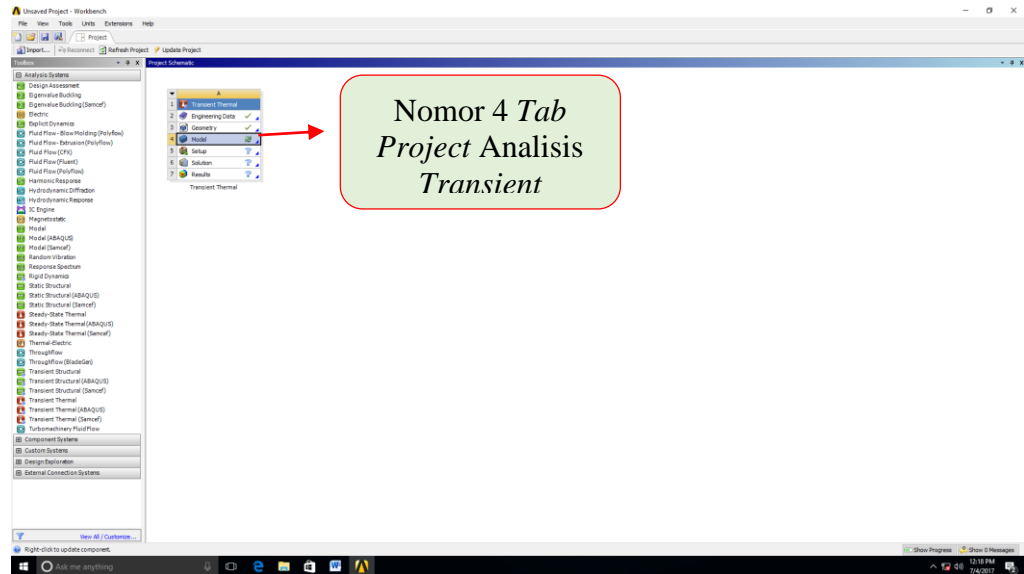


Kemudian memilih *import geometry* dan memasukkan data yang akan dinalisis.



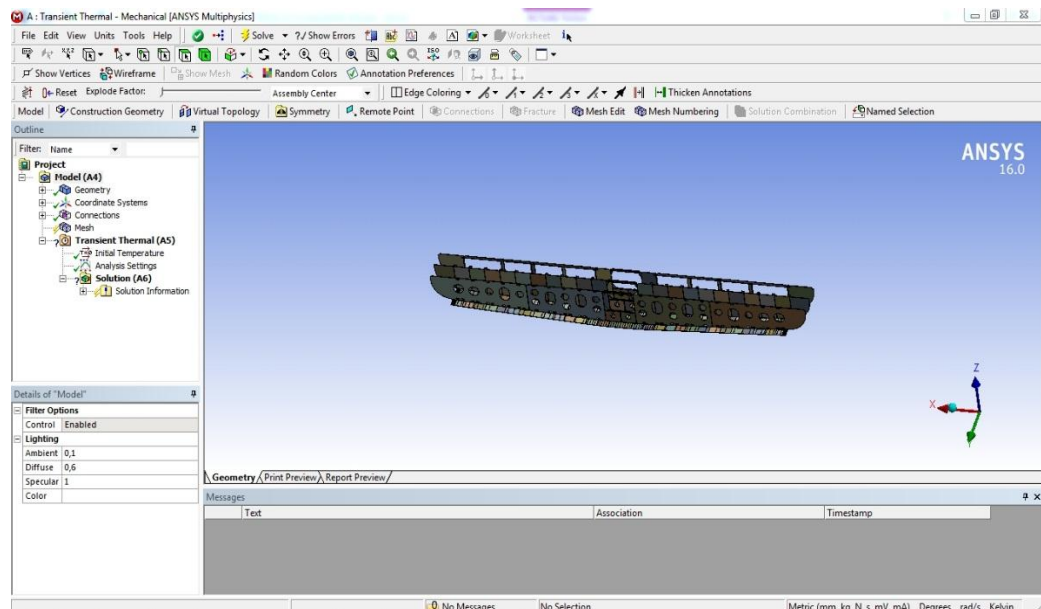
Pada umumnya, jenis data yang dimasukkan memiliki ekstensi .sat atau .iges yang telah ditentukan pada tahap pemodelan di AutoCad. Tetapi untuk analisis ini memakai ekstensi .iges.

5. Membuka Data yang telah dimasukkan.

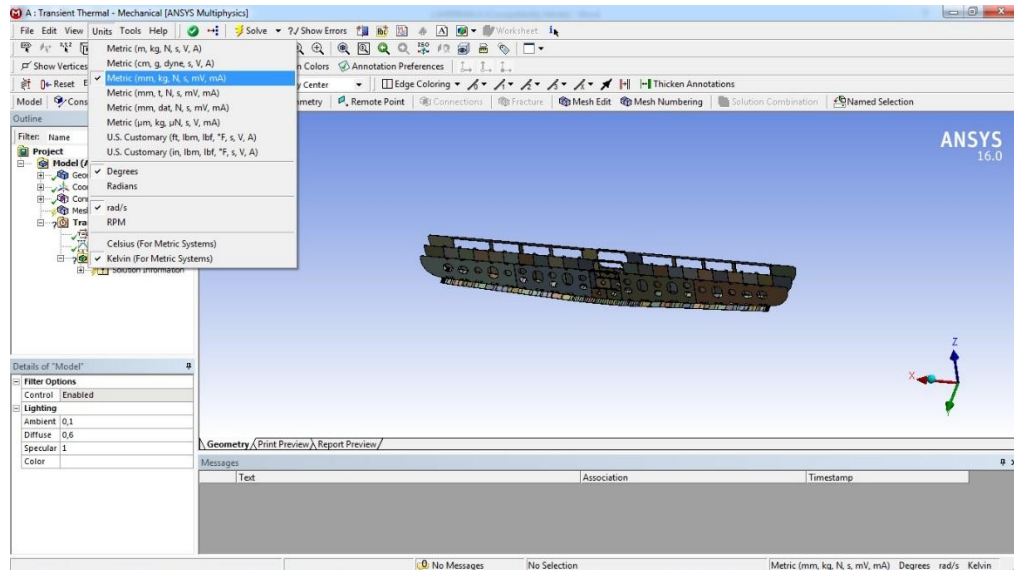


Cara untuk membuka data yang telah dimasukkan yaitu mengklik dua kali pada pilihan “model” atau yang ada pada nomor 4 *tab project analisis transient thermal*.

6. Tampilan Mechanical [ANSYS Multiphysics].

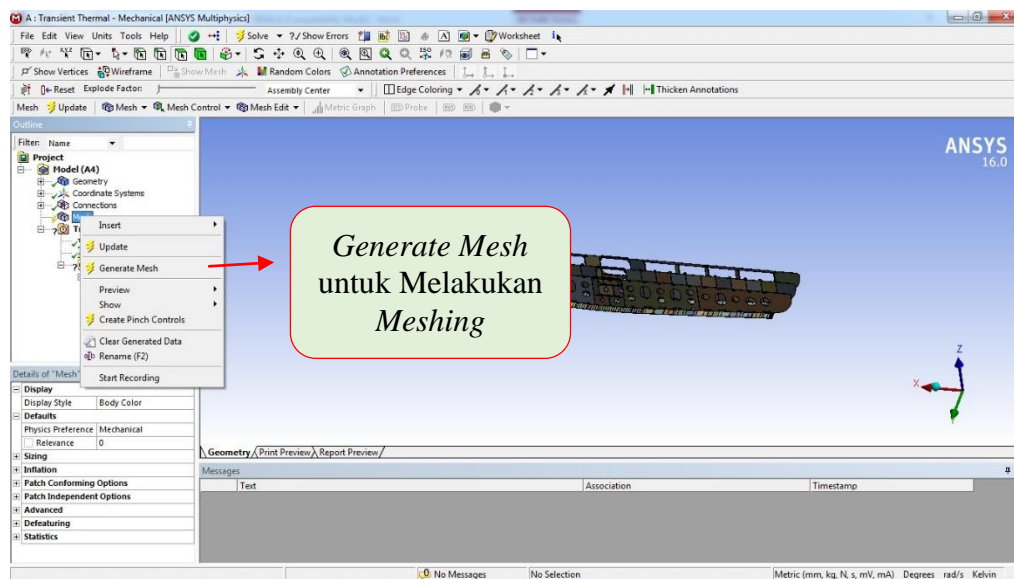


7. Menentukan Unit Satuan yang akan digunakan.

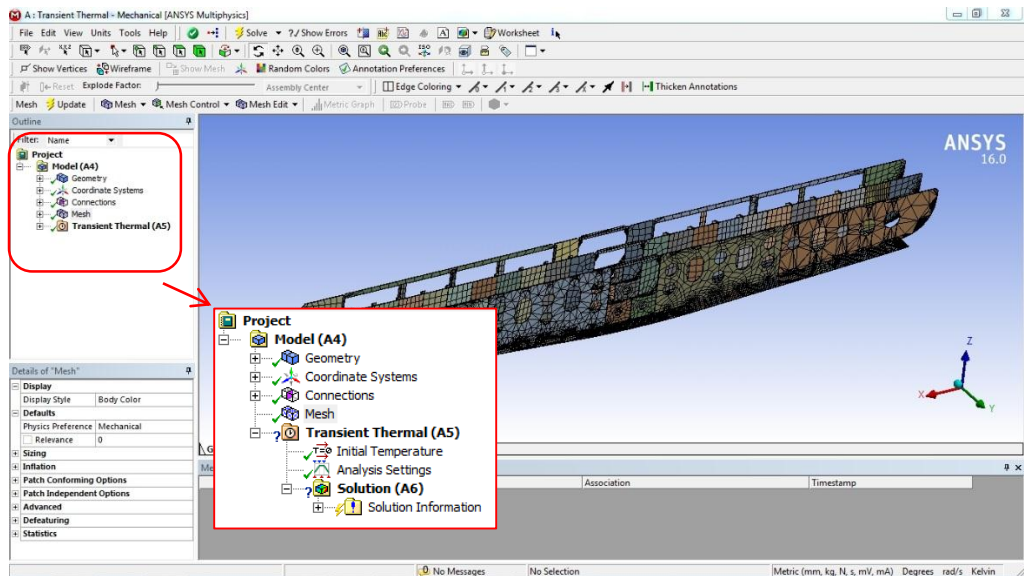


Cara menentukan unit satuan yang akan digunakan dalam analisis yaitu mengklik *tab menu “Units”*.

8. Melakukan *Meshing*.

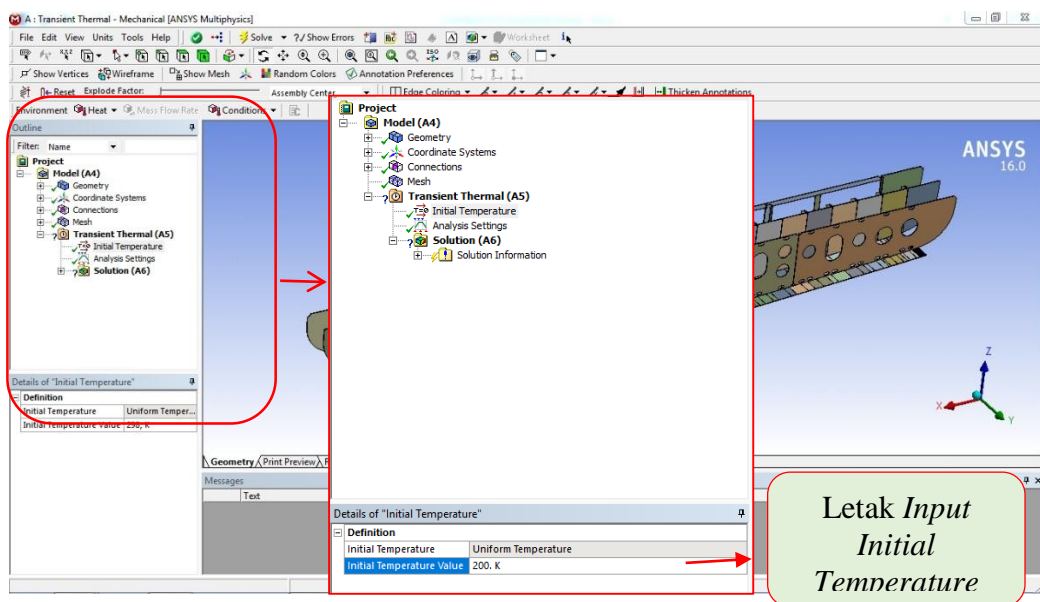


Meshing dilakukan dengan cara mengklik *Mesh*, lalu *Generate Mesh*.



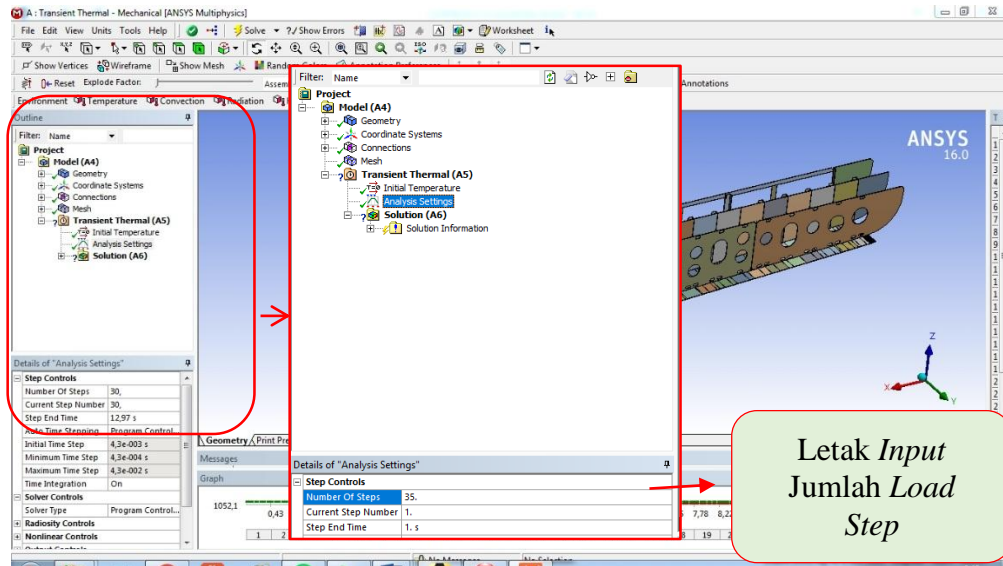
Meshing dianggap berhasil jika tanda petir disamping *Mesh* telah berubah menjadi tanda centang.

9. Memasukkan *Initial Temperature*.



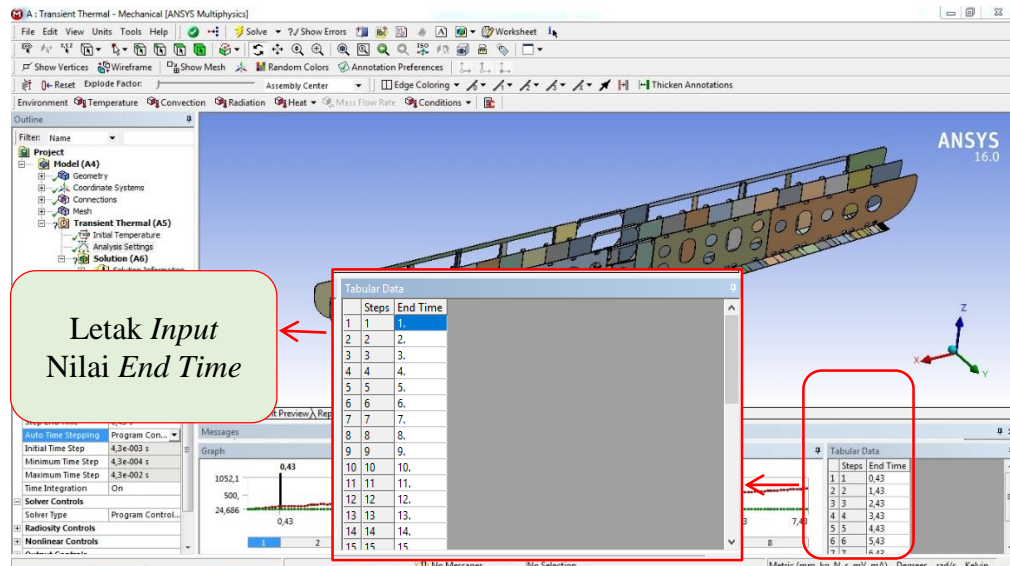
Cara memasukkan *initial temperature* yaitu mengklik *initial temperature* yang terdapat pada *outline*, kemudian nilai suhu dimasukkan pada *detail*, tepatnya di *initial temperature value*.

10. Memasukkan Jumlah *Load Step*.



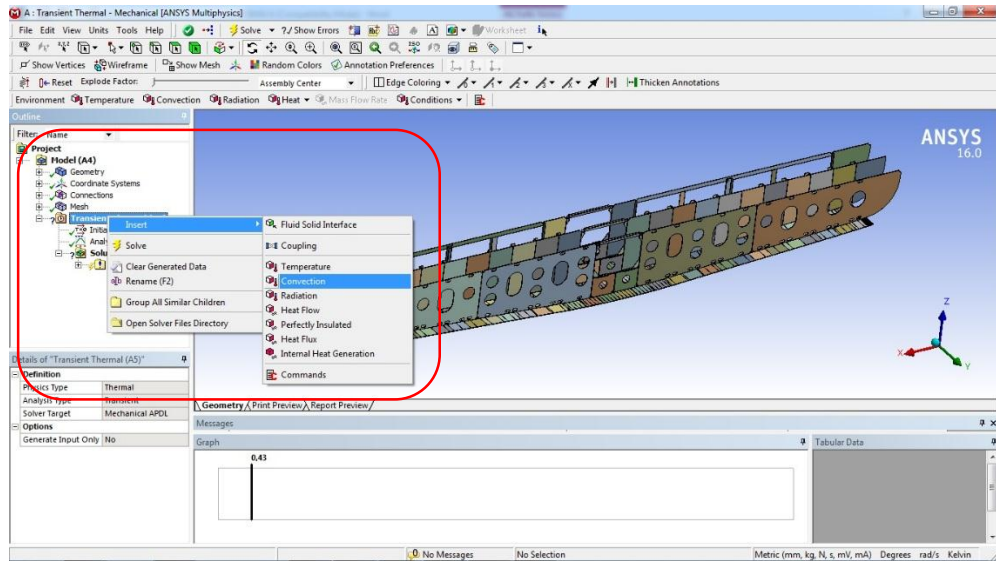
Jumlah *load step* yang dimasukkan tergantung pada hitungan yang telah dilakukan, dan masing-masing *load step* memiliki nilai parameter pengelasan (*end time*, *convection* dan *heat flux*) yang berbeda satu sama lain.

11. Memasukkan Nilai *End Time* masing-masing *Load Step*.



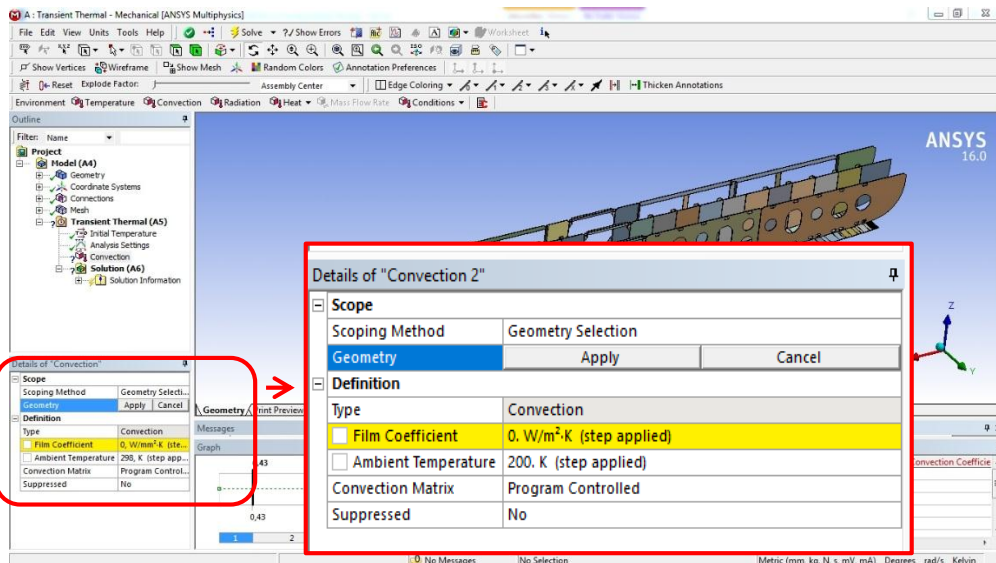
Nilai *end time* diperoleh dari perhitungan parameter pengelasan yang telah dijelaskan di Bab IV.

12. Memasukkan Nilai Konveksi.

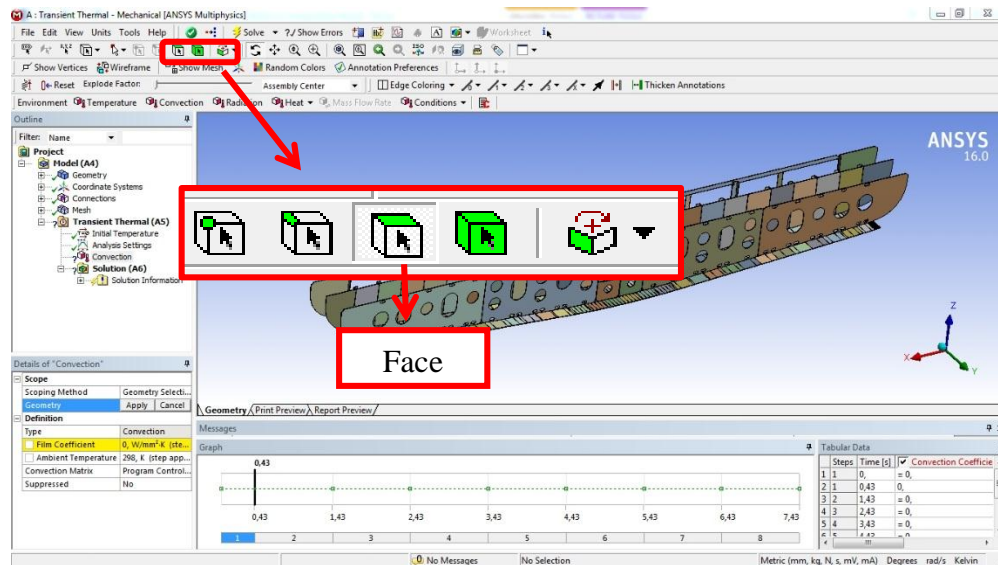


Cara memasukkan nilai konveksi yaitu mengklik kanan *Transient Thermal (A5)* pada *outline*, lalu pilih *insert*, kemudian *convection*.

13. Tampilan Tab Detail Konveksi.

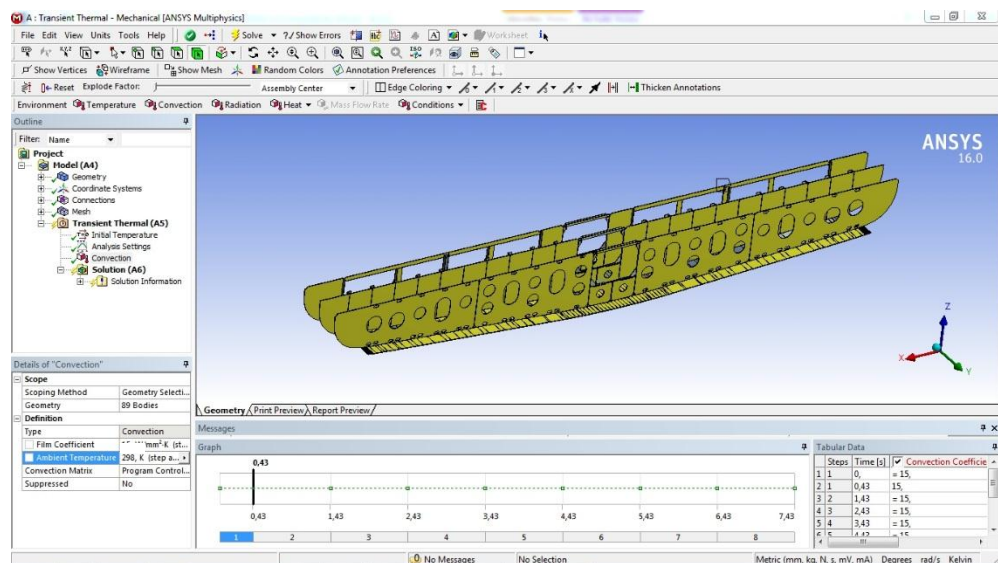


Ketika memasukkan nilai konveksi, parameter yang digunakan ialah *Film Coefficient* sebesar $15 \text{ W/m}^2\text{K}$, dan *Ambient Temperature* sebesar 298 K . Setelah memasukkan parameter konveksi, langkah selanjutnya ialah mengaplikasikan parameter tersebut di geometri yang telah ditentukan.



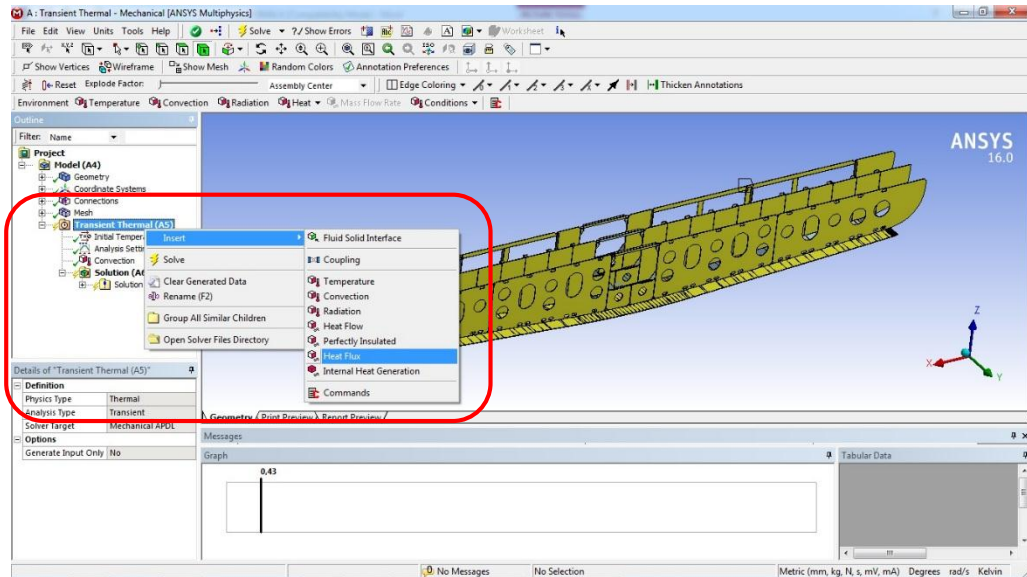
Jenis pemilihan geometri yang dilakukan dalam pengaplikasian konveksi ialah *Face*, atau dapat langsung dilakukan pengetikan *hotkey* yaitu Ctrl+F.

14. Tampilan Konstruksi Pasca Pengaplikasian Konveksi.



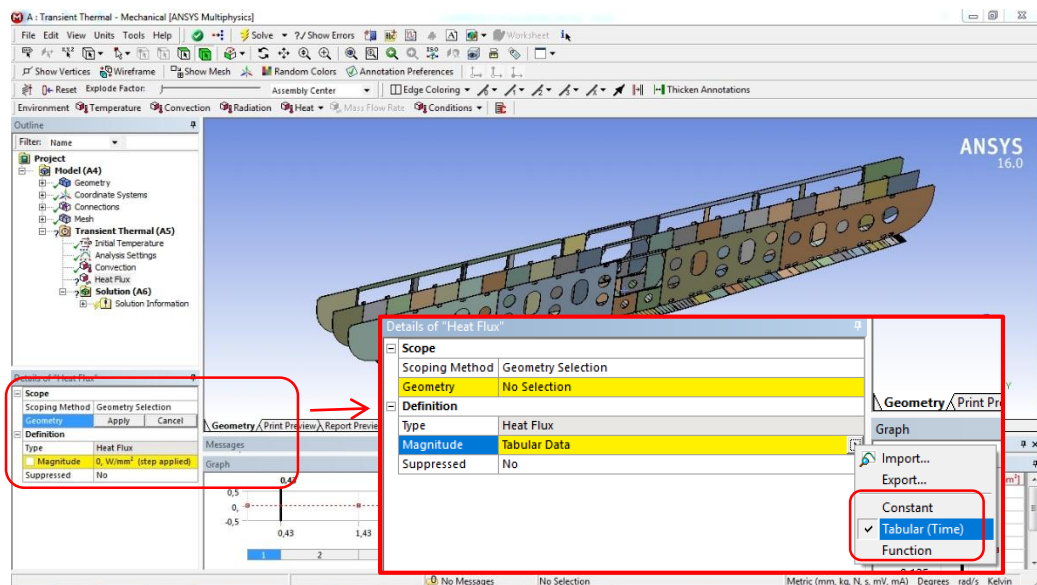
Input konveksi dikatakan berhasil jika tanda tanya disamping *convection* berubah menjadi tanda centang.

15. Memasukkan Nilai *Heat Flux*.

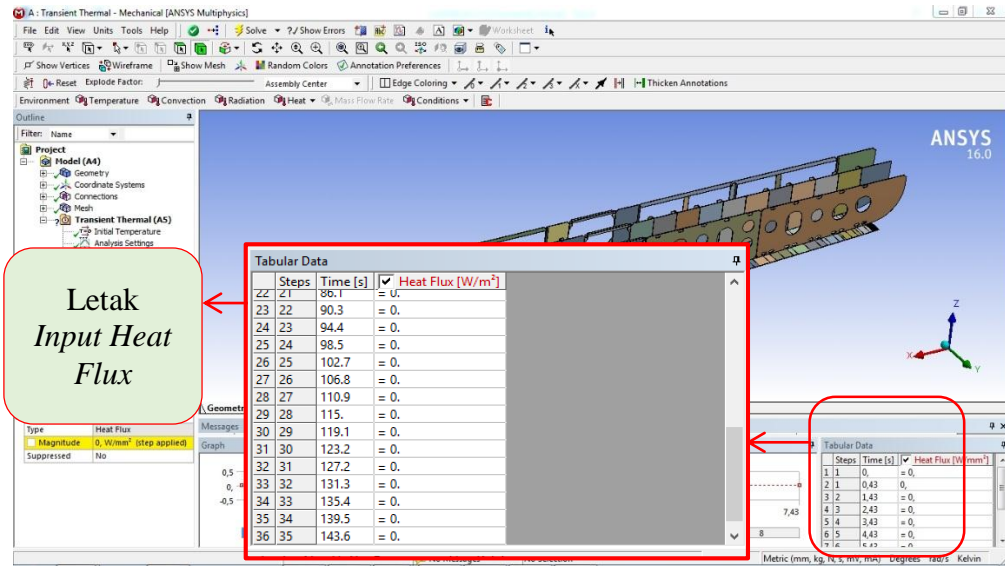


Cara memasukkan nilai *heatflux* yaitu mengklik kanan *Transient Thermal (A5)* pada *outline*, lalu pilih *insert*, kemudian *heat flux*.

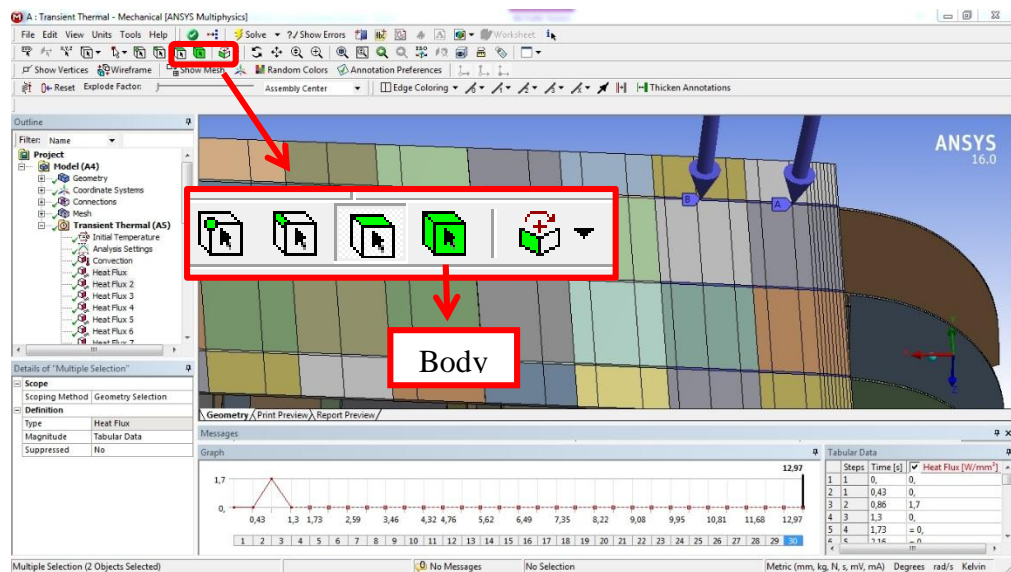
16. Tampilan *Tab Detail Heat Flux*.



Ketika memasukkan *heat flux*, jenis *input* diubah terlebih dahulu mejadi *Tabular (Time)*, karena analisis yang dilakukan ialah *transient thermal*.

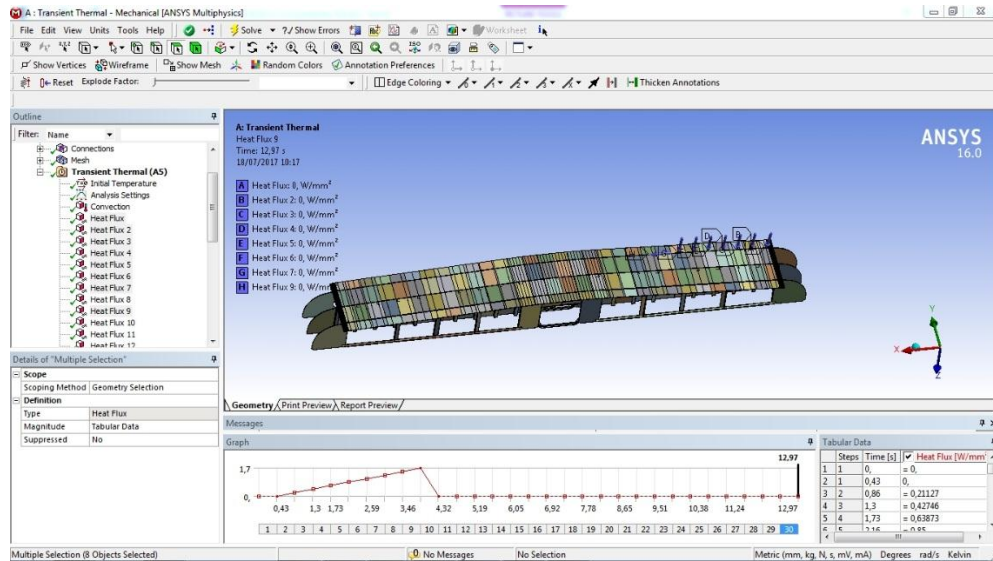


Setelah itu, nilai *heat flux* dimasukkan sesuai dengan hitungan yang telah ditentukan.



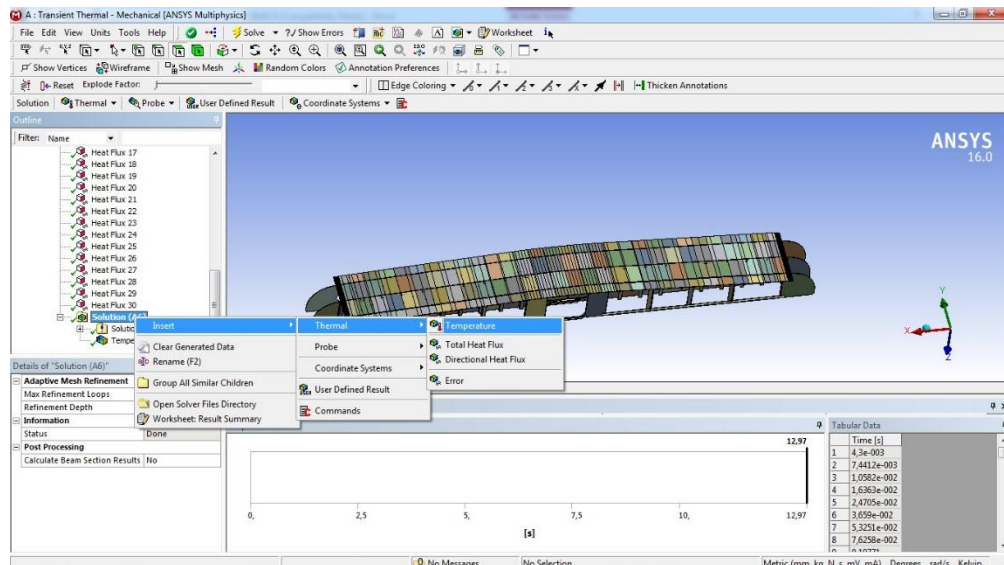
Jenis pemilihan geometri yang dilakukan dalam pengaplikasian konveksi ialah *Body*, atau dapat langsung dilakukan pengetikan *hotkey* yaitu Ctrl+B.

17. Tampilan Konstruksi Pasca Pengaplikasian *Heat Flux*.



Input heat flux dikatakan berhasil jika tanda tanya disamping *heat flux* berubah menjadi tanda centang.

18. Running Analisis Transient Thermal



Cara untuk melakukan *running* yaitu mengklik *Solution (A6)* pada *outline*, lalu klik *insert*, kemudian *thermal*, dan terakhir *temperature*.

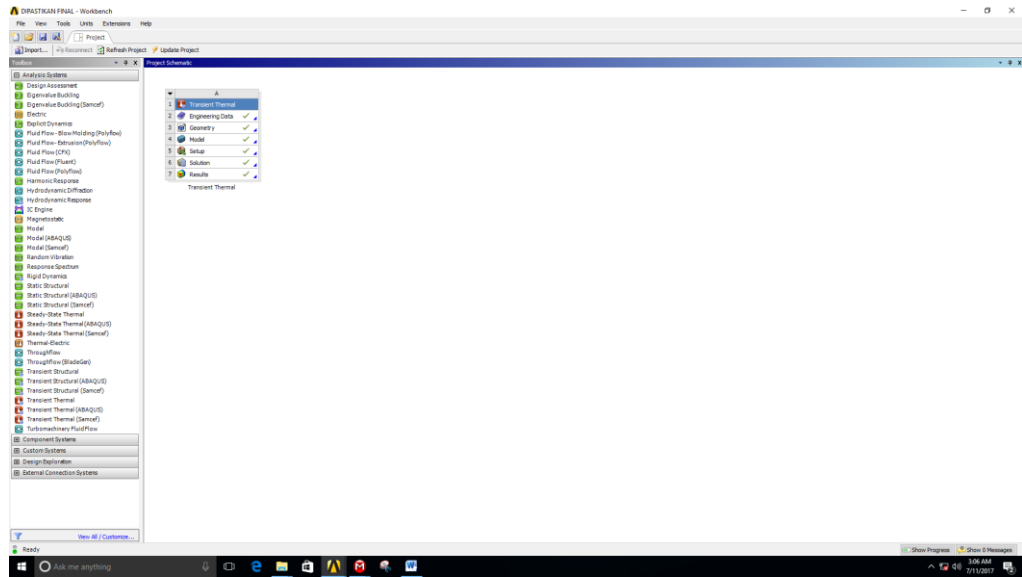
(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN C

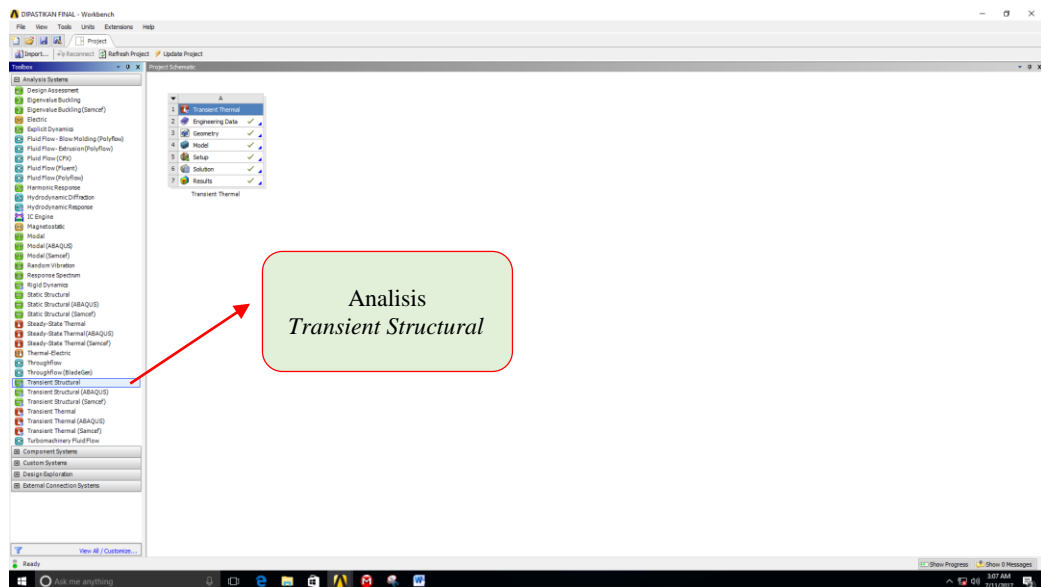
PERMODELAN STRUKTURAL

(halaman ini sengaja dikosongkan)

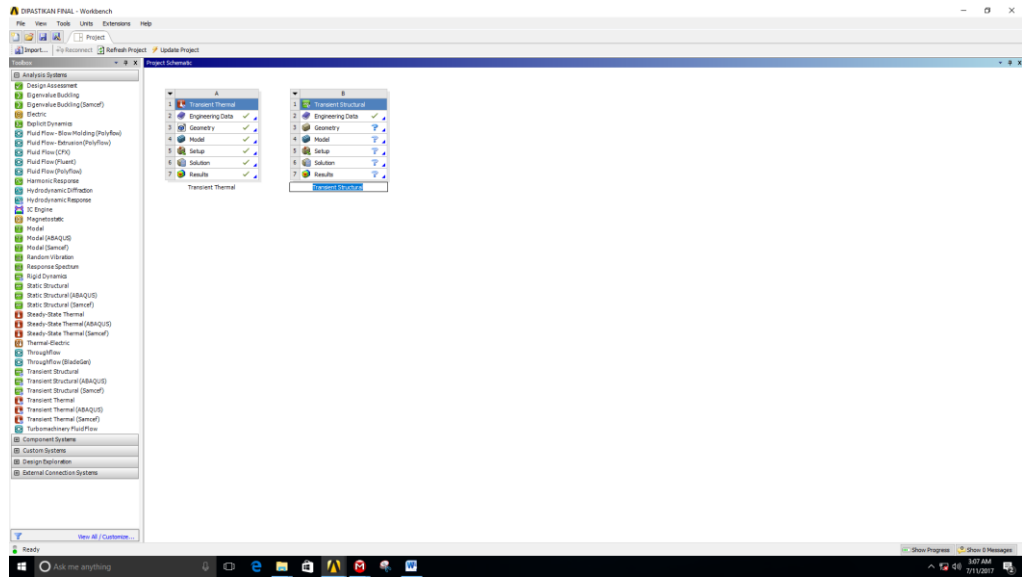
1. Tampilan Awal ANSYS Workbench 16.0 Pasca Analisis *Transient Thermal*



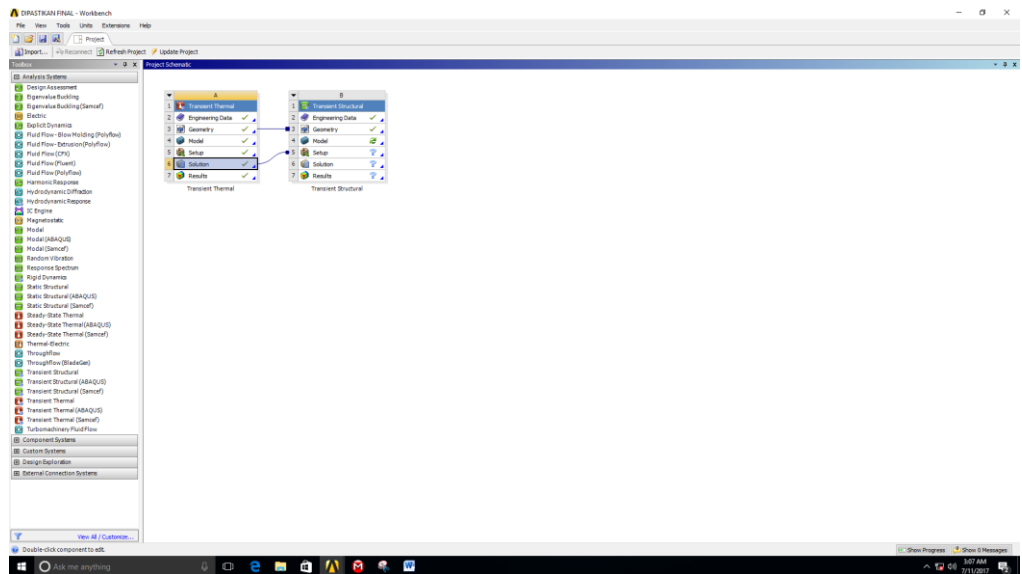
2. Memilih Jenis Analisis “*Transient Structural*”.



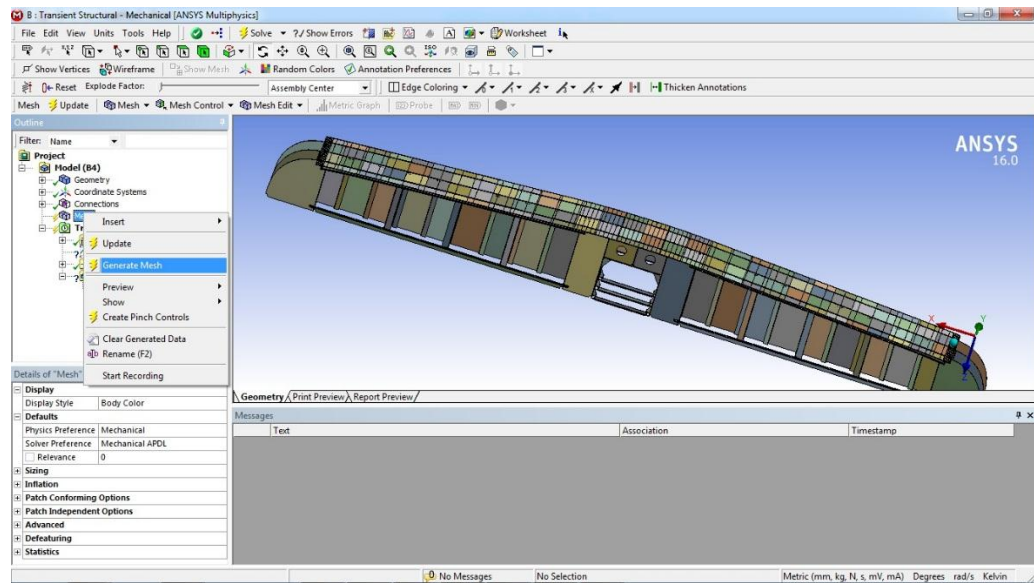
Kemudian membawa analisis *transient structural* ke *Project Schematic*.



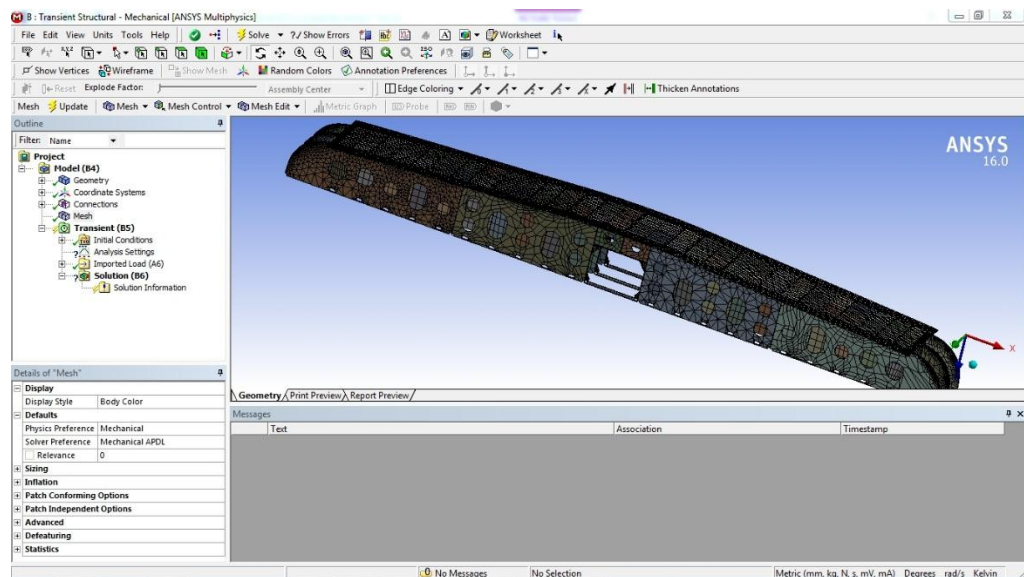
3. Menghubungkan Data Geometri dan *Solution* Analisis *Transient Thermal* ke Analisis *Transient Structural*



4. Membuka Data yang telah dimasukkan dan Melakukan *Meshing*

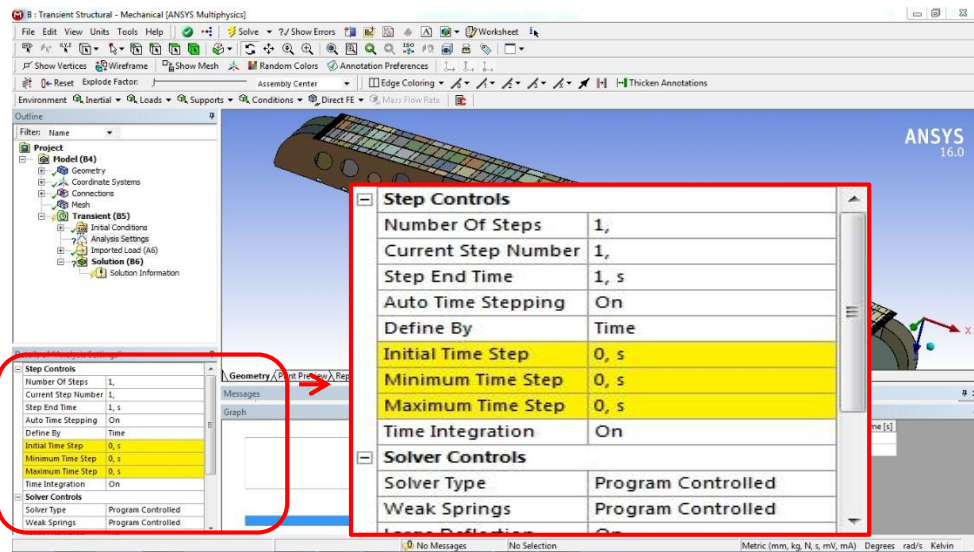


5. Tampilan Konstruksi setelah *Meshing*



Pada dasarnya, *meshing* yang dilakukan masih sama seperti yang dilakukan di analisis *transient thermal*.

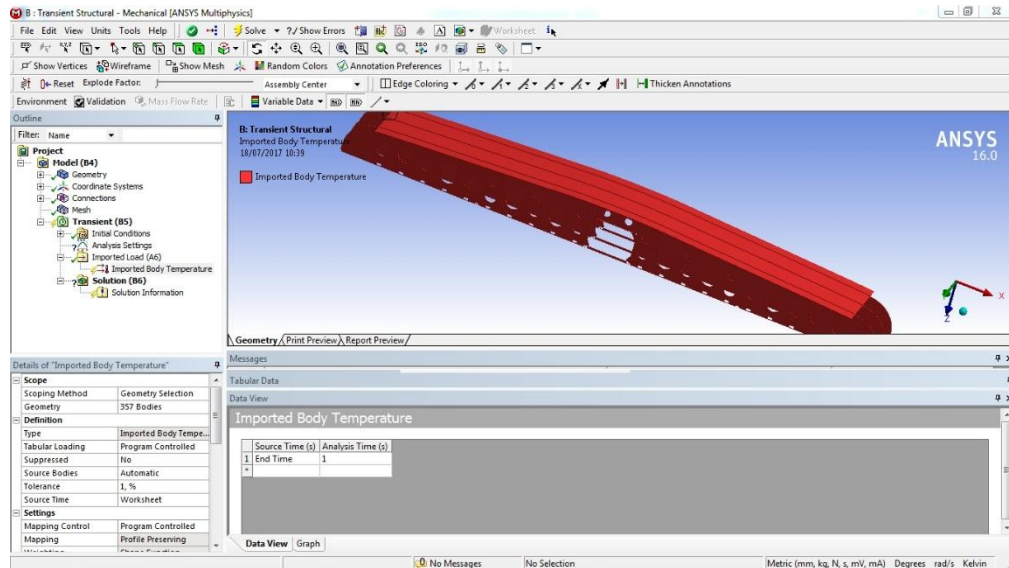
6. Memasukkan Data *Load Steps*



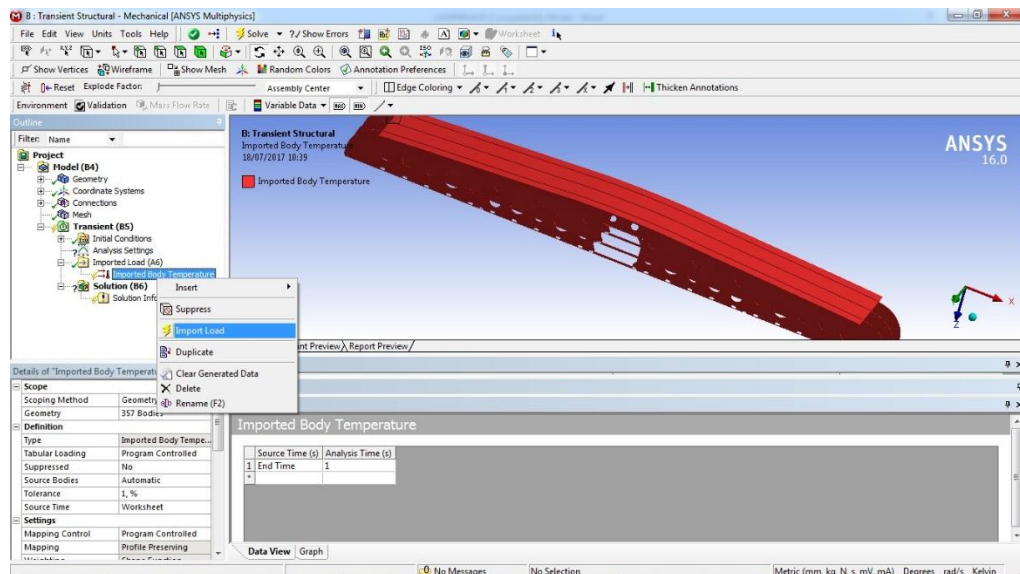
Baris yang perlu diisi ialah:

- ➔ Number of steps : 1
- ➔ Step end time : 5
- ➔ Initial time step : 0,1
- ➔ Minimum time step : 0,1
- ➔ Maximum time step : 5

7. Mengimpor Beban Panas ke Analisis *Transient Structural*

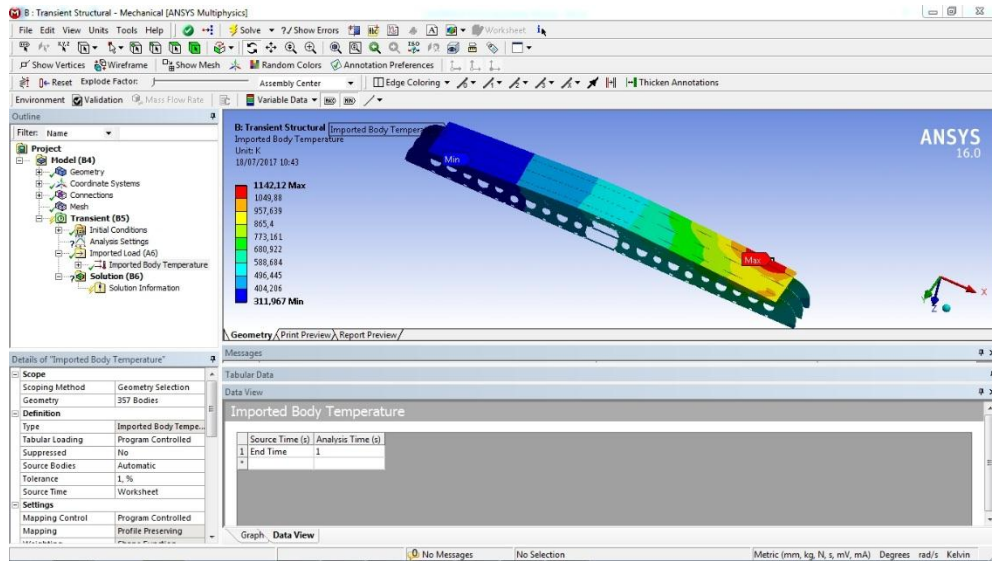


Setelah itu, klik *source time* pada *details of "imported body temperature"*, dan pilih "all". Hal tersebut dilakukan untuk mengimpor seluruh beban panas yang dihasilkan dari analisis *transient thermal*.

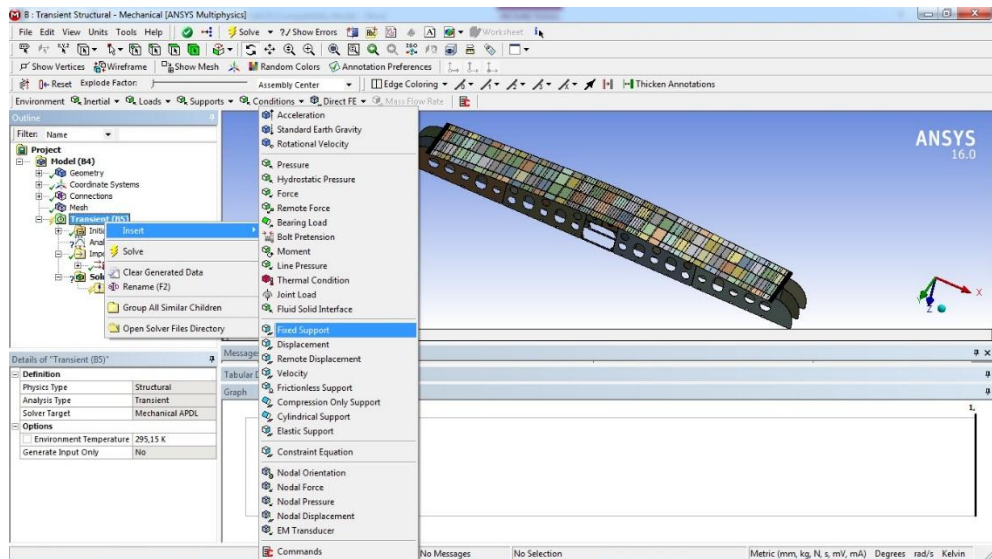


Setelah itu klik kanan pada *imported body temperature* untuk mengimpor beban panas.

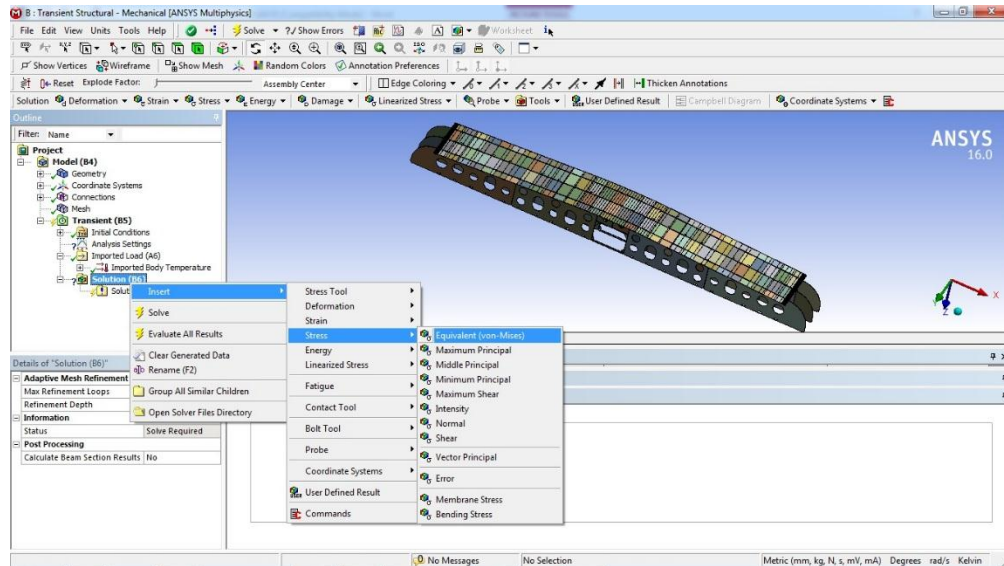
8. Tampilan Pasca Impor Beban Panas



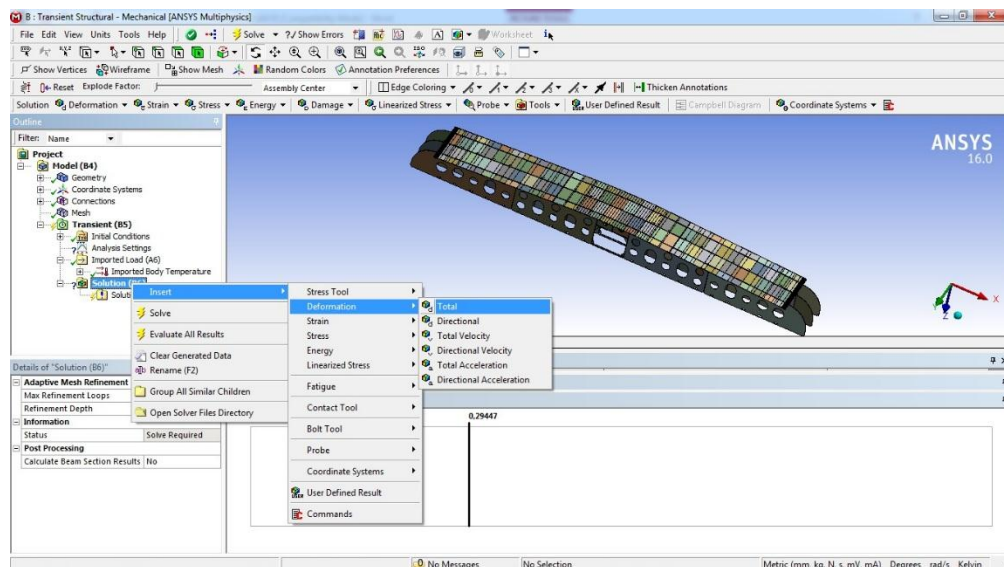
9. Memberikan *Boundary Condition* berupa *Fixed Supports*



10. Running Analisis Transient Structural



Cara untuk melakukan *running* yaitu mengklik *Solution* (A6) pada *outline*, lalu klik *insert*, kemudian *stress*, dan terakhir *equivalent (von-mises)*. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui hasil tegangan sisa.



Untuk distorsi, klik *insert*, kemudian *deformation*, dan terakhir *total*. Setelah semua dilakukan, proses *running* telah siap dilakukan.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Lahir di Jakarta pada tanggal 12 Februari 1994. Terlahir dengan nama Fauzan Awal Ramadhan, penulis merupakan anak ketiga dari pasangan Kadar dan Sumi Siswantini. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 03 Pagi Srengseng Sawah, SMP N 41 Jakarta, dan SMA N 28 Jakarta. Tamat pada tahun 2012, setelah tamat SMA penulis tidak langsung melanjutkan pendidikan ke jenjang Strata 1 (S1) melainkan melanjutkan pendidikan agama di Pondok Pesantren WALI BAROKAH Kediri.

Selanjutnya pada tahun 2013 penulis mulai melanjutkan pendidikan ke jenjang Strata 1 (S1) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Di ITS penulis lulus di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan melalui jalur SBMPTN mandiri. Pada masa perkuliahan, penulis aktif dalam organisasi mahasiswa di tingkat jurusan yaitu sebagai Ketua Departemen Kewirausahaan Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (KWU HIMATEKLA 15/16). Selain aktif di organisasi mahasiswa, penulis juga tergabung dalam komunitas pecinta Vespa di ITS yang biasa disebut dengan SHITS (Scooter Holic ITS). Pada masa studinya, penulis tertarik pada bidang struktur dan produksi bangunan lepas pantai. Sehingga pada tahun 2016, penulis mendapatkan kesempatan Kerja Praktik (KP) di PT. Rekayasa Industri (REKIND). Ketertarikan ini, kemudian membuat penulis mengambil Tugas Akhir dengan tema tegangan sisa dan distorsi akibat pengelasan.

Fauzan Awal Ramadhan

Jurusan Teknik Kelautan, FTK, ITS

Contact Person:

No. HP : 0813 3134 8349

E-mail : fauzanawalramadhan@gmail.com